



**Universidade de Aveiro**  
**Ano 2016**

Departamento de Engenharia Mecânica

**André Filipe Matos da**  
**Cruz Silva**

**Desempenho de um Rotor de Savonius:**  
**Avaliação Experimental**





**André Filipe Matos**  
**da Cruz Silva**

**Desempenho de um Rotor de Savonius:**  
**Avaliação Experimental**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e da Doutora Joana Valente, Investigadora do Departamento de Ambiente e Ordenamento.



Dedico este trabalho à minha Mãe, ao meu Pai e à minha irmã que sempre me ajudaram e apoiaram para que eu concluísse esta etapa da minha vida.



## **Júri**

Presidente

**Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo**

Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogal – Arguente Principal

**Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogal – Orientador

**Professor Doutor Fernando José Neto da Silva**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro





## **Agradecimentos**

Agradeço ao Professor Doutor António Manuel Godinho Completo pela disponibilização do rotor de Savonius que projetou e pela sua cooperação e interesse pelo trabalho desenvolvido.

Agradeço à Engenheira Sandra Sorte pela disponibilidade que sempre manteve e também pela partilha de conhecimento sobre o laboratório do túnel do vento.

Quero agradecer ao Nuno Miguel Marques da Costa, assistente operacional do Departamento de Ambiente e Ordenamento que colaborou com a adaptação do túnel do vento para que pudesse ser instalado o rotor de Savonius.

Agradeço ao professor Doutor Fernando Neto pela disponibilidade e orientação nesta dissertação.



**Palavras-chave** Rotor de Savonius, Energia eólica, Turbina eólica, Coeficiente de Potência, Coeficiente de Binário, Coeficiente de velocidade periférica.

## **Resumo**

A energia eólica é atualmente uma fonte de energia renovável utilizada pelo homem através de diferentes mecanismos.

O rotor de Savonius, uma turbina de eixo vertical, é uma opção para produção de energia em pequena escala.

A produção e venda de energia elétrica à rede pública, fruto de fontes renováveis, é hoje em dia uma opção enquadrada na nossa legislação.

Com base no potencial das características dos rotores de Savonius analisou-se experimentalmente quatro configurações diferentes com o intuito de comparar as suas performances, sendo que a configuração de centro aberto e pás fechadas obteve os melhores resultados ao nível de produção de energia eólica.



**Key words**

Savonius rotor, Wind energy, wind turbine, power coefficient, torque coefficient, Tip Speed ratio.

**Abstract**

Wind energy is currently a renewable energy source used by man through different mechanisms.

The Savonius rotor, a vertical-axis turbine, is an option for small-scale power production.

The production and sale of electricity to the public grid, by renewable sources, is nowadays an option framed in our legislation.

Based on the potential of the characteristics of the Savonius rotors, four different configurations were experimentally analyzed in order to compare their performances, being that open-center and closed-bladed configuration obtaining the best results of wind energy production.



# Índice

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO E ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS.....	1
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	1
1.3 PORQUÊ DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	2
1.4 A ENERGIA EÓLICA.....	4
1.5 TURBINAS EÓLICAS .....	6
1.6 ROTORES DE EIXO VERTICAL.....	8
1.6.1 Rotor de Savonius.....	8
1.6.2 Rotor Darrieus .....	8
1.7 ROTORES DE EIXO HORIZONTAL .....	9
1.8 CONDICIONALISMOS LEGISLATIVOS .....	9
<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1 SÍNTESE DO CAPÍTULO .....	20
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGIA E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
3.1 DESCRIÇÃO DA TURBINA E DO GERADOR.....	22
3.2 DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	27
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	32
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
4.1 DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTE DE POTÊNCIA .....	35
4.2 DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTE DE BINÁRIO .....	36
4.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE VELOCIDADE PERIFÉRICA .....	37
4.4 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO GASOSO .....	39
4.5 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS PARA DIFERENTES GEOMETRIAS .....	39
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO .....</b>	<b>49</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>
---	-----------

<b>ANEXOS .....</b>	<b>53</b>
---------------------	-----------

ANEXO A – CÁLCULO DA VELOCIDADE DO VENTO NO TÚNEL DO VENTO .....	53
--	----

ANEXO B – GRÁFICOS COEFICIENTE DE POTÊNCIA .....	55
--	----

ANEXO C – GRÁFICOS DE COEFICIENTE DE BINÁRIO .....	58
--	----

ANEXO D. DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO...	61
--	----

## Lista de tabelas

Tabela 1-Resultados para os diferentes rotores. ....	19
--	----

Tabela 2-Adaptação em tabela os resultados obtidos. ....	20
--	----

Tabela A. 1-Folha de cálculo Centro fechado e pás abertas .....	53
---	----

Tabela A. 2-Folha de cálculo Centro fechado e pás abertas .....	53
---	----

Tabela A. 3-Folha de cálculo Centro aberto e pás fechadas .....	54
---	----

Tabela A. 4-Folha de cálculo Centro aberto e pás fechadas .....	54
---	----



## Lista de figuras

Figura 1-Moinho Persa e Panémona Chinesa.....	2
Figura 2-Turbina eólica de Charles Bruch.....	3
Figura 3-Evolução da produção de energia eólica no mundo .....	4
Figura 4-Evolução da produção de energia eólica em Portugal.....	5
Figura 5-Evolução da produção de energia eólica na Europa .....	5
Figura 6-Distribuição da velocidade do vento ao passar numa turbina eólica. ....	6
Figura 7-Coeficiente de potência de vários aerogeradores .....	7
Figura 8- Vistas turbina eólica .....	8
Figura 9 - Rotor Darrieus .....	9
Figura 10-Unidade de produção para autoconsumo .....	11
Figura 11-Unidade de pequena produção.....	11
Figura 12-Rotores utilizados .....	13
Figura 13-Esquema de um rotor de Savonius. a) Vista frontal; b) Vista de topo.....	15
Figura 14-Rotor de Savonius com o sistema de medição de binário; .....	16
Figura 15 - a) Design I, b) Design II, c) Design III d) Geometria Design III .....	17
Figura 16-Contornos da velocidade (m/s) do ar ao redor do rotor de Savonius, a) convencional, b) Design III .....	18
Figura 17-Circuito implementado nos terminais do rotor .....	21
Figura 18-Rotor de Savonius pás fechadas e pás abertas .....	23
Figura 19-A-Centro aberto; B-Centro fechado .....	23
Figura 20-Base superior do rotor de Savonius .....	24
Figura 21-gerador síncrono de ímanes permanentes .....	25
Figura 22-interior do gerador síncrono de ímanes permanentes.....	26
Figura 23-Túnel do Vento .....	27
Figura 24-variador de frequência .....	28
Figura 25 - Manómetro.....	28

Figura 26-Medidor de velocidade de rotação .....	29
Figura 27-Matriz de contactos.....	30
Figura 28-Osciloscópio.....	30
Figura 29-Tubo de Pitot .....	31
Figura 30-Resistência elétrica.....	31
Figura 31-Ligação em estrela.....	33
Figura 32-Coeficiente de potência em diferentes configurações .....	36
Figura 33-Coeficiente de Binário em diferentes configurações .....	37
Figura 34- Coeficiente de velocidade periférica em função das rotações .....	38
Figura 35-Rotações nas diferentes configurações .....	39
Figura 36-Coeficiente de binário para as diferentes resistências no centro aberto e pás abertas.....	40
Figura 37-Coeficiente de potência para as diferentes resistências no centro aberto e pás abertas.....	41
Figura 38-Coeficiente de binário para as diferentes resistências no centro aberto e pás fechadas.....	42
Figura 39-Coeficiente de potência para as diferentes resistências no centro aberto e pás fechadas.....	43
Figura 40-Coeficiente de binário para as diferentes resistências no centro fechado e pás abertas.....	44
Figura 41-Coeficiente de potência para as diferentes resistências no centro fechado e pás abertas .....	44
Figura 42-Coeficiente de binário para as diferentes resistências no centro fechado e pás fechadas.....	45
Figura 43-Coeficiente de potência para as diferentes resistências no centro fechado e pás fechadas .....	46
Figura B.1-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de 22 $\Omega$ .....	55
Figura B.2-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de 10 $\Omega$ .....	55

Figura B.3-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de $4,7\Omega$ .....	56
Figura B.4-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de $3,3\Omega$ .....	56
Figura B.5-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de $1,5\Omega$ .....	57
Figura B.6-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de $0,22\Omega$ .....	57
Figura C.1-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de $22\Omega$ .....	58
Figura C.2-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de $10\Omega$ .....	58
Figura C.3-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de $4,7\Omega$ .....	59
Figura C.4-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de $3,3\Omega$ .....	59
Figura C.5-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de $1,5\Omega$ .....	60
Figura C.6-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de $0,22\Omega$ .....	60
Figura D.1 – Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência $10\Omega$ .....	61
Figura D.2 – Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência $4,7\Omega$ .....	61
Figura D.3 – Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência $3,3\Omega$ .....	62
Figura D.4 - Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência $1,5\Omega$ .....	62
Figura D.5 - Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência $0,47\Omega$ .....	63
Figura D.6 - Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência $0,22\Omega$ .....	63

## **Lista de Abreviaturas e Acrónimos**

IRS - Imposto sobre o Rendimento das Pessoas Singulares

RESP - Rede Elétrica de Serviço Público

RPM - Rotações por minuto

UPAC - Unidade produção de Autoconsumo

UPP - Unidade de Pequena Produção

## Lista de Símbolos

Símbolo	Designação	Unidades
A	Área transversal à passagem do vento	m <sup>2</sup>
$a$	Diâmetro do eixo do rotor	m
C <sub>p</sub>	Coeficiente de potência	W/W
C <sub>t</sub>	Coeficiente de Binário	(N m)/(N m)
D	Diâmetro do rotor	m
$e$	Distância entre as partes interiores das pás do rotor	m
F	Força	N
f	Frequência de onda elétrica	Hz
g	Aceleração da gravidade	m/s <sup>2</sup>
H	Altura do rotor de Savonius	m
n	Velocidade de rotação	rpm
P	Potência	W
P <sub>0</sub>	Pressão de estagnação	mm H <sub>2</sub> O
P <sub>s</sub>	Pressão estática	mm H <sub>2</sub> O
p	Número de polos do gerador	
R	Raio rotor do Savonius	m
R <sub>e</sub>	Resistência elétrica	Ω
s	Massa	kg
T	Binário	N m
V <sub>eficaz</sub>	Tensão eficaz	V
v	Velocidade do vento	m/s

## Lista de Letras gregas

Símbolo	Designação	Unidades
$\beta$	Razão de sobreposição	m/m
$\lambda$	Coeficiente de velocidade periférica	(m/s)/(m/s)
$\rho_{ar}$	Densidade do ar	kg/m <sup>3</sup>
$\omega$	Velocidade angular	Rad/s



## **Capítulo 1 Introdução e Enquadramento**

### **1.1 Objetivos**

Esta dissertação tem como principal objetivo analisar e avaliar o desempenho de uma turbina eólica do tipo Savonius em diferentes configurações e numa situação de laboratório em que seja possível controlar as condições externas.

### **1.2 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos principais. No primeiro capítulo apresenta-se de forma sucinta os objetivos e a estrutura apresentada para o desenvolvimento desta dissertação, seguindo-se o enquadramento sobre a importância das energias renováveis e nomeadamente da energia eólica sendo abordados os motivos para o desenvolvimento deste tipo de energia alternativa. Também encontra-se explícita a situação atual da produção de energia elétrica a partir de energia eólica no mundo e quais as razões para o investimento neste tipo de energia em detrimento das fontes de energia fóssil e energia nuclear. São apresentados também os conceitos gerais sobre turbinas eólicas, particularmente no que se refere ao rotor de Savonius, tais como as suas principais características ao nível da sua conceção e da sua utilidade.

No segundo capítulo é efetuada a revisão bibliográfica, debruçando-se sobre os trabalhos experimentais efetuados por outros autores sobre rotores de Savonius bem como a análise económica do seu desempenho.

O terceiro capítulo, Metodologia e Métodos, tem como objetivo apresentar a descrição de toda a conjuntura que envolve o trabalho em laboratório apresentando as descrições do material utilizado e das características da turbina utilizada neste capítulo, é ainda descrita a realização do trabalho experimental. No quarto capítulo designado por Resultados e Discussão apresentam-se diversos gráficos sobre os resultados experimentais e também a análise e discussão realizada aos mesmos.

No término do trabalho apresenta-se o quinto capítulo, que tem como objetivo fazer uma análise sobre o trabalho que foi elaborado, e com isto apresentar as conclusões que se obtêm com o mesmo, assim como descrever um pouco sobre o que se poderá fazer num trabalho futuro sobre o mesmo.

### 1.3 Porquê das energias renováveis

Ao longo dos tempos o homem descobriu as vantagens que a agricultura lhe podia trazer, através da produção dos seus próprios alimentos. Com o percurso de evolução da agricultura este foi desenvolvendo ferramentas que o auxiliassem em trabalhos que de outro modo teriam de ser feitos através de força braçal ou animal tais como bombagem de água ou a moagem de grãos. Existem referências de moinhos de vento que surgiram com o intuito de ajudar o homem na moagem de grão e bombagem de água, na Pérsia em 200 A.C.[1]

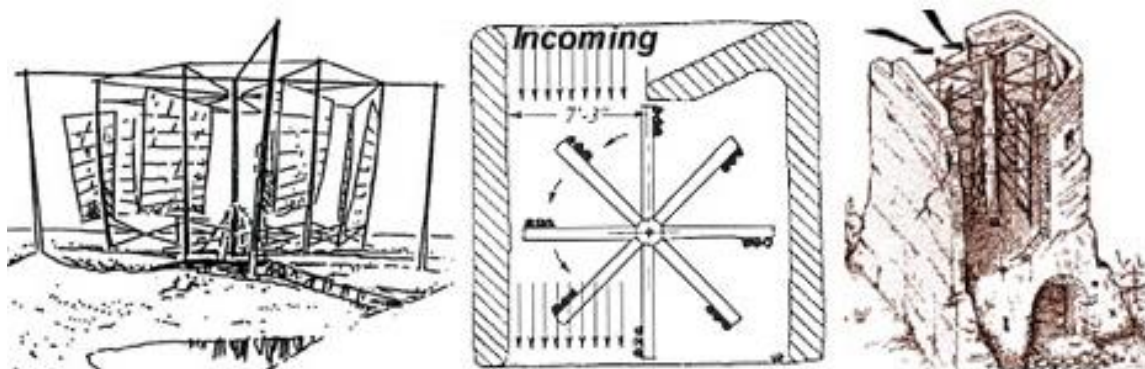


Figura 1-Moinho Persa e Panémona Chinesa[1]



O conceito de turbina eólica para produção de energia elétrica apenas surge em 1888 quando Charles F Brush constrói a primeira turbina que gera eletricidade.[1]

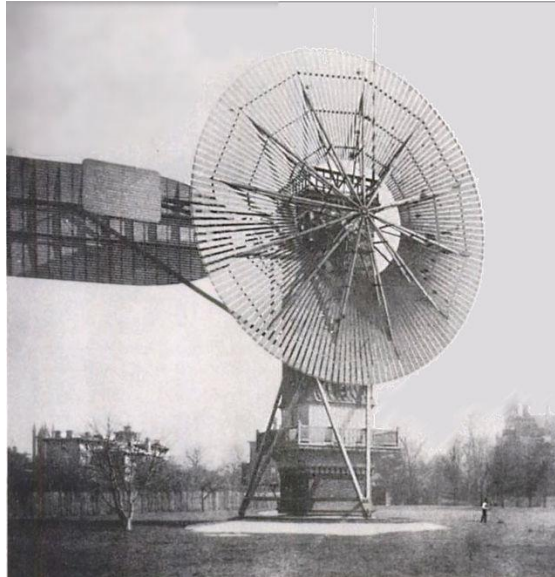


Figura 2-Turbina eólica de Charles Bruch[1]

A turbina (Figura 2) apresentava um diâmetro de rotor de 17 m e continha 144 pás de madeira e embora tivesse um tamanho considerável possuía apenas 12kW de potência.[2]

Poul la Cour no final do século XIX realiza uma série de estudos e experiências com o auxílio do túnel do vento onde obtém desenhos de hélices eólicas cujos seus princípios aerodinâmicos são aceites ainda nos dias de hoje.[2]

Com a otimização da rede elétrica pública e com a abundância de recursos fósseis, ainda que as ideias que haviam surgido sobre a obtenção de energia através de recursos naturais não tiveram grande desenvolvimento e aproveitamento durante muitos anos.

Na década de 70 com a crise petrolífera e na década de 80 com o acidente de Chernobyl a energia proveniente de recursos fósseis e a energia nuclear foram muito contestados, no primeiro caso porque houve um melhor entendimento de que os recursos fósseis seriam finitos, adicionalmente porque a utilização de recursos fósseis liberta grande

quantidade de poluentes tais como o CO<sub>2</sub> que provocam o fenómeno de aquecimento global na base de grandes alterações climáticas.

No início da década de 80 formou-se a associação de energia eólica europeia e no seu seio começou a debater-se e a implementação e a utilização com mais frequência de parques eólicos.[3]

Já em 1997 o protocolo de Quioto foi subscrito por um número significativo de países como meta de redução em 5% do valor das emissões atingido em 1990, até 2012. Com este objetivo houve uma vez mais a preocupação de investir em energias limpas. Em 2007 a união europeia adotou medidas políticas com o intuito de que 20% da energia elétrica consumida seja proveniente de energia eólica até 2020.[3]

## 1.4 A energia eólica

Em seguimento dos factos apresentados no ponto anterior verificou-se uma aposta gradual na energia eólica um pouco por todo o mundo.

No gráfico da Figura 3, podemos verificar que nos últimos quinze anos tem havido uma grande aposta na produção de energia eólica mundial, com um aumento gradual da produção de energia eólica ao longo dos anos relativamente ao ano anterior sendo este aumento é aproximadamente de 20%. Através de uma análise da produção de energia eólica entre 1998 e 2012 verifica-se que o seu valor aumentou em cerca de trinta e duas vezes.

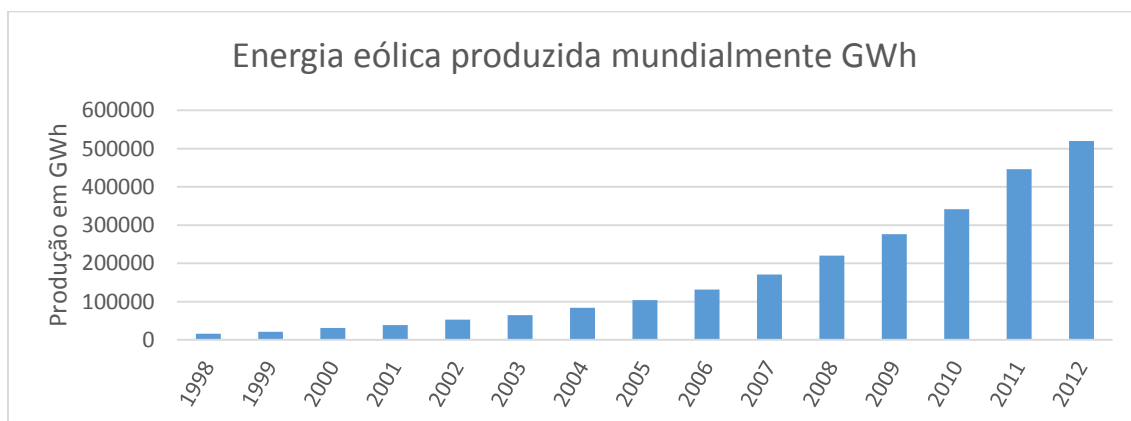


Figura 3-Evolução da produção de energia eólica no mundo[4]

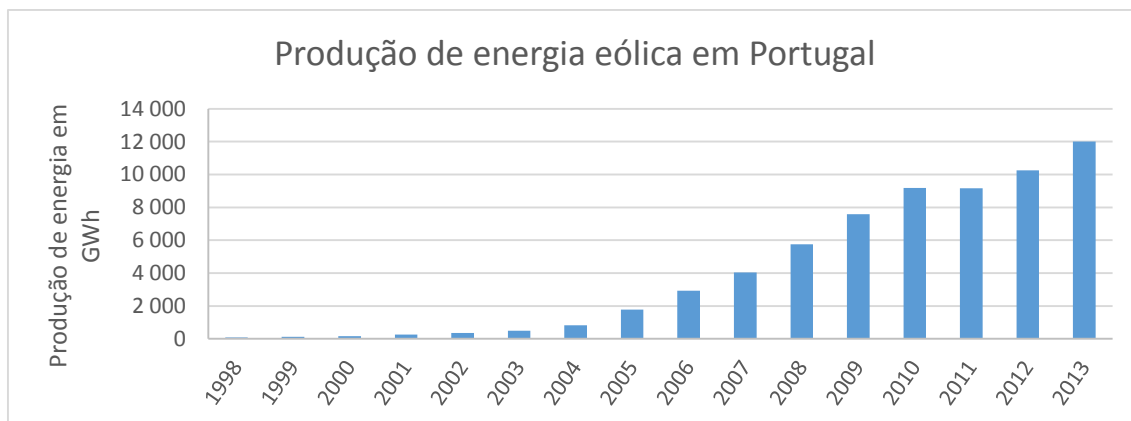


Figura 4-Evolução da produção de energia eólica em Portugal[5]

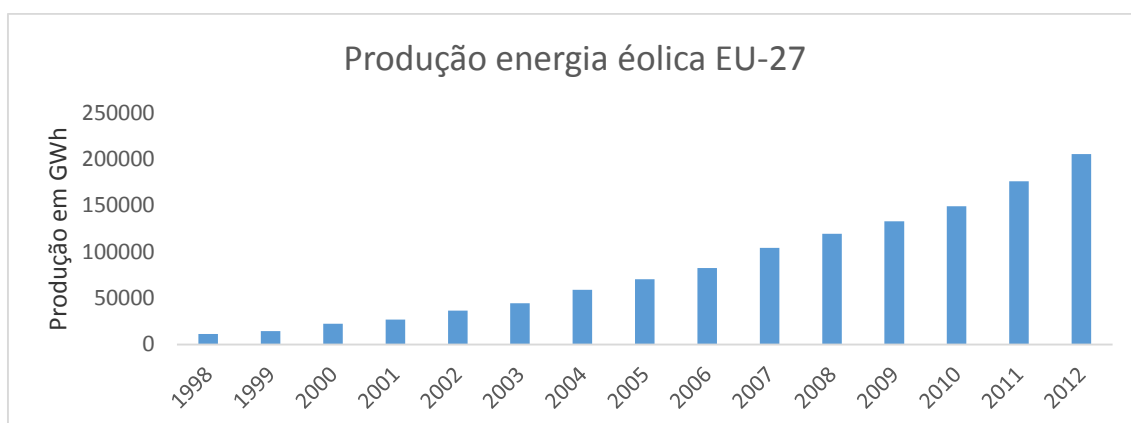


Figura 5-Evolução da produção de energia eólica na Europa[4]

Os gráficos da figura 3, 4 e 5 apresentam um crescimento exponencial, o que demonstra a importância tanto a nível mundial como europeu da energia eólica. As medidas tomadas globalmente para promover o crescimento da energia eólica são transversais a muitos países do mundo e a União Europeia. Maioritariamente a produção de energia eólica é feita em grandes centrais eólicas. Nos dias de hoje cada vez mais se procura ter casas autossustentáveis que consigam produzir a sua própria energia. Os pequenos geradores eólicos de baixa potência são cada vez mais estudados a fim de se tentar comercializar estes sistemas e soluções energéticas ao nível do setor residencial e doméstico.

## 1.5 Turbinas eólicas

Em todas as turbinas eólicas é essencial considerar a transformação de energia cinética do vento em energia mecânica que por sua vez se transformará em energia elétrica.

Posto isto, teremos de ter em conta alguns conceitos gerais sobre energia. A energia de uma massa de ar em movimento é apresentada pela equação 1 da energia cinética.[6]

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Ou seja, considerando uma massa de ar  $m$ , a uma certa velocidade  $v$ , que passa por uma área transversal  $A$ , obtemos a equação da potência  $P$ . [6]

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2)$$

Através deste conceito Albert Betz, físico alemão, fez um estudo para determinar o coeficiente de potência  $C_p$  máximo que poderíamos retirar de uma turbina eólica, ou seja qual a percentagem da potência do vento que poderá ser convertida em potência mecânica. Ele considerou um conceito representado na Figura 6 onde se verifica que a velocidade  $v_1$  é maior que  $v_2$  e também que  $v_3$  isto porque através da passagem pela turbina o vento transformará energia eólica em energia mecânica e assim perderá velocidade.

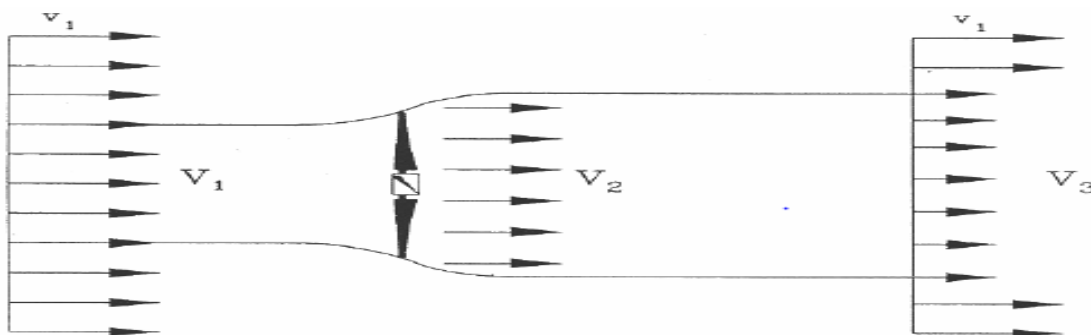


Figura 6-Distribuição da velocidade do vento ao passar numa turbina eólica.[1]

Então Albert Betz chega à conclusão que o coeficiente de potência máximo seria 0,593. O coeficiente máximo calculado por Albert Betz está representado pelo gráfico A na Figura 7.[7]

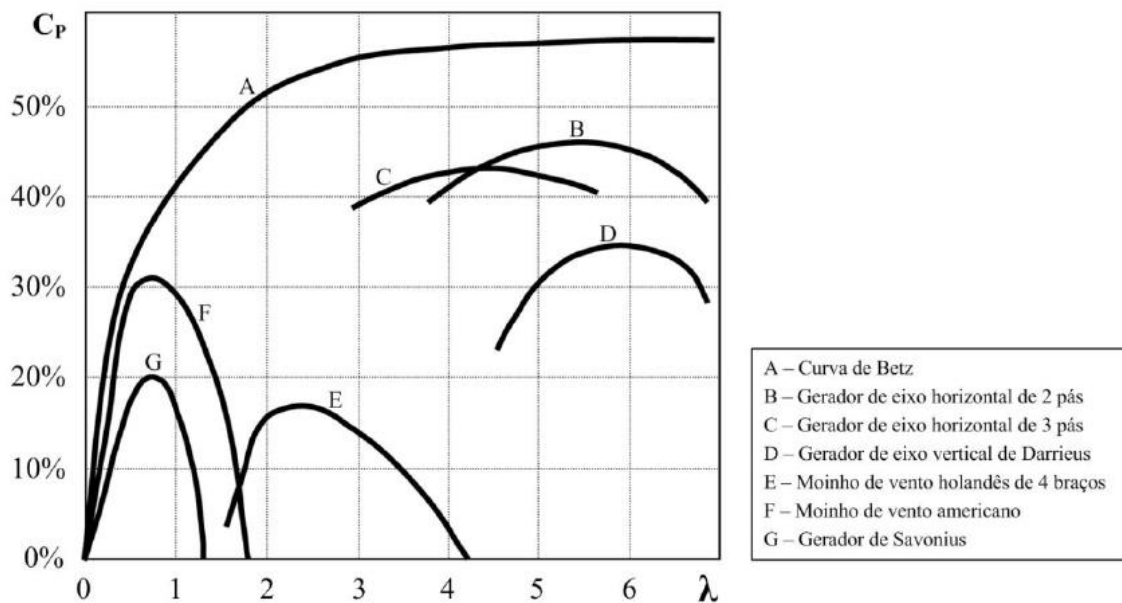


Figura 7-Coeficiente de potência de vários aerogeradores[8]

Como podemos verificar na Figura 7, a curva G, representativa do rotor de Savonius apresenta um coeficiente de potência máximo muito menor que a maioria dos rotores, tais como os de eixo horizontal. Mas não deveremos ter só este aspeto em consideração numa avaliação da sua utilidade uma vez que o rotor do Savonius apresenta uma configuração de fácil construção e ainda apresenta uma emissão de ruído mais baixa relativamente a outros rotores o que faz com que apresente vantagens ao nível económico que podem ser tidas em conta no momento da sua utilização.[9]

## 1.6 Rotores de Eixo Vertical

### 1.6.1 Rotor de Savonius

O rotor de Savonius é uma turbina de eixo vertical composta por duas pás cilíndricas e tem como característica a possibilidade de captação de energia eólica independentemente da direção da velocidade do vento.

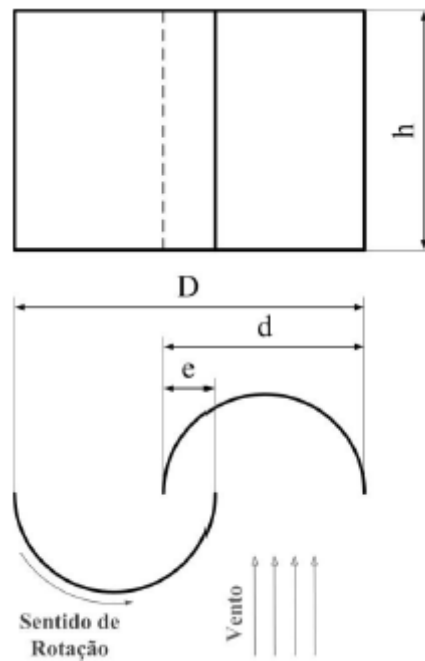


Figura 8- Vistas turbina eólica[10]

Na Figura 8 apresentam-se as vistas principal e superior de uma configuração básica de um rotor de Savonius. Este rotor aproveita a velocidade do vento e através da diferença da força de arrasto entre a superfície côncava e convexa da pá que origina um momento que faz com que o rotor gire.

### 1.6.2 Rotor Darrieus

A turbina Darius foi patenteada pelo engenheiro aeronáutico Jean Marie Georges Darius(Figura 9). Esta turbina de eixo vertical tem como principais características, não depender da direção do vento para que as suas hélices rodem o que proporciona uma

vantagem devido ao facto de não necessitarem um mecanismo auxiliar para direccionar as hélices em função da direcção do vento e ainda tem a vantagem de se poder montar uma caixa de engrenagens e o gerador perto do solo o que facilita a sua montagem e a manutenção.

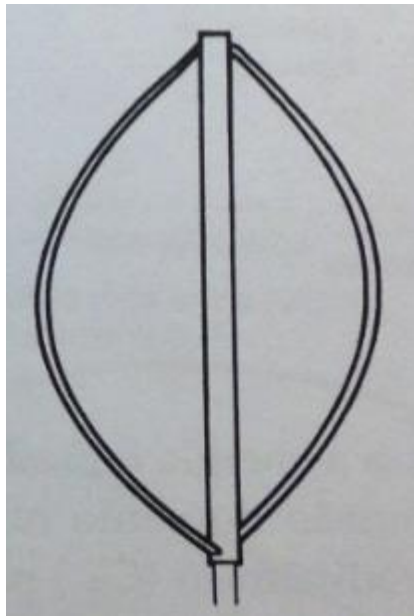


Figura 9 - Rotor Darrieus[11]

O rotor de Savonius obtém a sua força motriz através da resistência aerodinâmica enquanto o rotor Darrieus obtém força motriz através da sustentação aerodinâmica.

### 1.7 Rotores de eixo horizontal

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns devido à sua maior eficiência relativamente aos rotores de eixo vertical. Sendo assim o seu maior custo de produção é compensado posteriormente com a sua maior produção de energia. Estes rotores são o tipo de rotores mais produzidos para aplicação em parques de produção de energia eólica.

### 1.8 Condicionalismos legislativos

As questões ao nível de legislação são importantes porque é através destes que a população poderá obter informação sobre como proceder para poder ter em sua casa uma unidade de pequena produção de energia eólica. Existem questões ao nível da fiscalização, segurança e taxas que incidem sobre instalações energéticas deste género.

Por vezes também existem incentivos fiscais onde se pode dedução dos valores investidos em equipamento para produção de energia eólica em sede de IRS, aos quais poderemos aderir para que possamos ter este tipo de produção em casa.[12][13][14][15]

O decreto-lei nº 153/2014, de outubro apresenta o regime jurídico referente à produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis. Neste decreto-lei a produção de energia elétrica é dividida em dois sistemas, um em que a energia produzida é injetada na sua totalidade na rede elétrica de serviço público (RESP), sendo este sistema designado por “unidade de pequena produção” (UPP).

Este tipo de unidades tem de ter uma potência de ligação inferior à potência contratada, sendo que esta terá de ser inferior a 250 kW. O valor de produção anual tem de ser inferior ao dobro da eletricidade consumida pela instalação de consumo ao qual está associada.

Por outro lado, existem as unidades de produção para autoconsumo (UPAC) que têm com principal objetivo satisfazer as necessidades de consumo do cliente podendo o excedente de produção ser injetado na RESP.

Este tipo de sistema tem de ter uma potência inferior à de contrato e a potência não pode ser superior a duas vezes a potência de ligação.

A remuneração da produção de energia elétrica no caso de ser uma UPP depende do tipo de energia primária utilizado. No caso da energia solar, a energia elétrica é remunerada ao preço da totalidade da tarifa de referência enquanto se tivermos como fonte de energia primária a energia eólica vende-se a 80 % da tarifa de referência.[13]

Durante o início de cada ano é publicado em portaria o valor da tarifa de referência. Para o ano de 2015 a tarifa de referência é de 95€/MWh.[13]



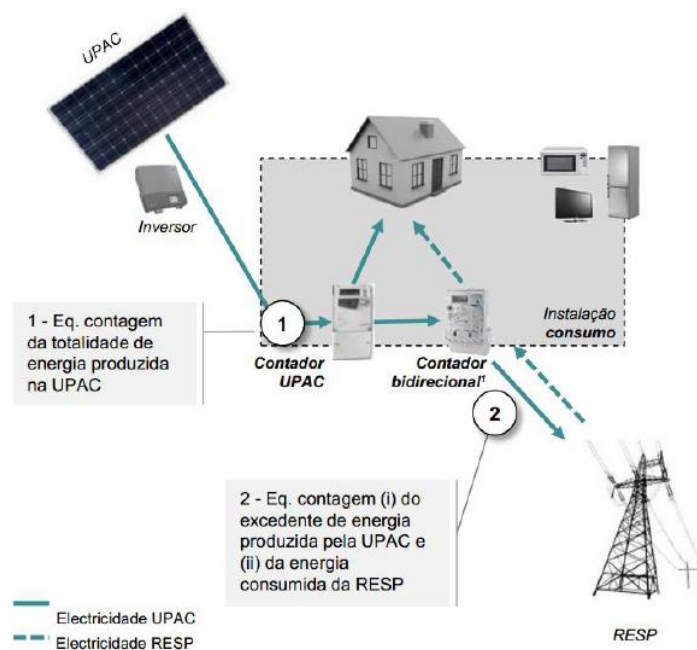


Figura 10-Unidade de produção para autoconsumo[16]

A Figura 10 demonstra a instalação de tipo UPAC neste caso alusivo a uma unidade de produção de energia solar.

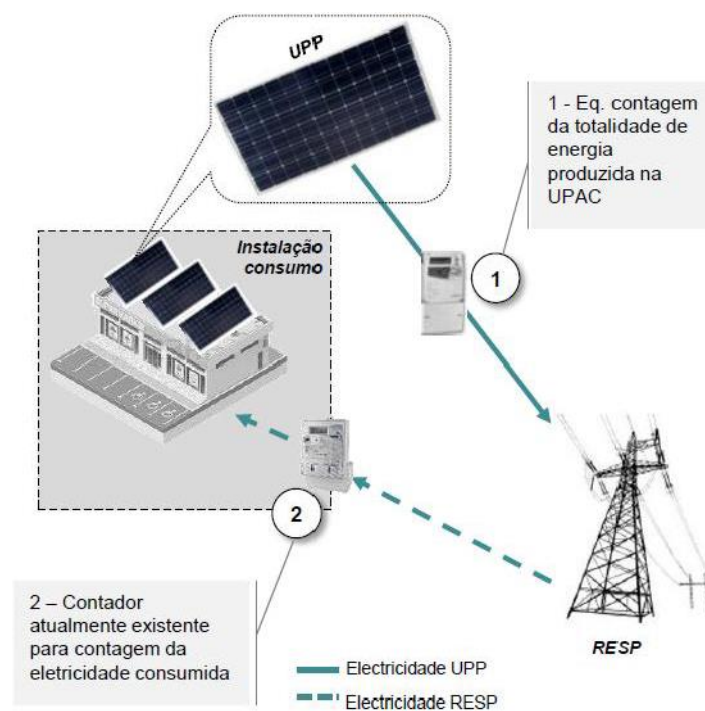


Figura 11-Unidade de pequena produção[16]

A Figura 11 mostra uma UPP onde como sabemos o objetivo será sempre injetar o total de energia elétrica produzida na RESP.

A produção de energia elétrica a partir de energia eólica começa assim a alargar horizontes deixando de estar confinada à produção de energia em grandes centrais eólicas.

## Capítulo 2 Revisão Bibliográfica

R. Ricci et al 2016 [9], fizeram um estudo sobre a implementação de rotores de Savonius num poste de eletricidade. O poste de eletricidade continha no seu corpo rotores de Savonius e deste modo tornava-se autossustentável.

Neste trabalho experimental foi utilizado um túnel do vento onde as velocidades de vento poderiam ir de 6m/s até 40 m/s para análise do desempenho do rotor de Savonius.

A velocidade angular do rotor controlada através dum sistema de travão de disco acoplado ao seu eixo sendo que em condições reais o binário produzido neste travão será provocado pelo gerador que se pode ligar ao rotor de Savonius.

O trabalho experimental foi realizado com três rotores (Figura 12). Os rotores têm como características diferenciadoras o ângulo de torsão que as pás fazem desde a base superior até à base inferior do rotor, sendo o primeiro rotor o género mais usual em que não há nenhum ângulo de torsão das pás e depois é-nos apresentado mais dois rotores com ângulos de 90° e 105°.

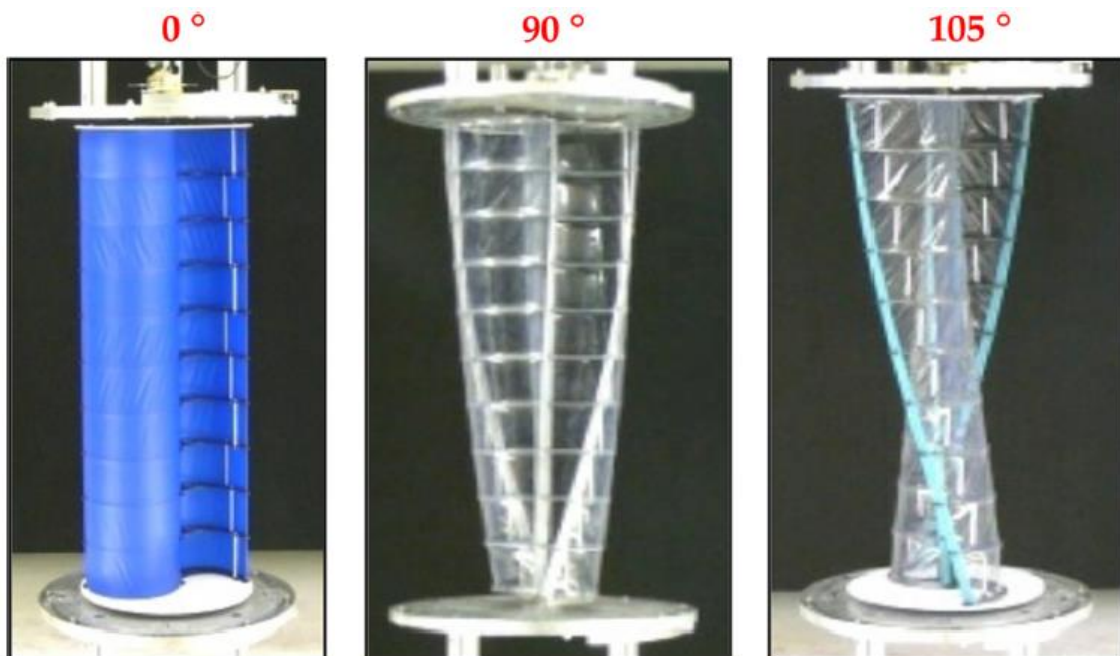


Figura 12-Rotores utilizados [9]

A experiência é feita de modo a verificar qual das configurações de rotor apresenta maior coeficiente de potência.

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot R \cdot n}{60 \cdot v} \quad (3)$$

Na realização deste trabalho experimental foi necessário utilizar a equação (3) que apresenta o coeficiente de velocidade periférica (razão entre a velocidade nas extremidades das pás e a velocidade do vento).

$$C_p = \frac{P}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (4)$$

Foi utilizada a equação (4) que nos apresenta o coeficiente de potência entre a potência mecânica do rotor obtida através da força que o travão faz no eixo do rotor e a potência do vento.

$$C_t = \frac{T}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot v^2} \quad (5)$$

Também teve como base a equação (5) representativa do coeficiente de binário entre o binário no eixo do rotor e o binário que o vento provoca na turbina.

Posto isto Ricci et al. 2016 [9], obtiveram vários resultados sendo que para um rotor de Savonius sem ângulo de torção nas pás obtiveram um  $C_p$  máximo de 0,245 para um  $\lambda$  de 0,854 sendo que os seus melhores resultados foram obtidos para o rotor helicoidal de 105º com um  $C_p$  máximo de 0,251 para um  $\lambda$  de 0,889.

N. H. Mahmoud et al 2012 [17], realizaram um estudo experimental com rotores de Savonius onde estudaram rotores com duas, três e quatro pás, com um e dois andares, com diferentes razões de sobreposição, 0, 0.2, 0.25, 0.3 e 0.35 e alongamento 0.5, 1, 2, 4 e 5, e ainda com e sem bases nas suas extremidades.

A razão de sobreposição é dada por:

$$\beta = \frac{(e-a)}{d} \quad (6)$$

Sendo que  $a$  é o diâmetro do eixo do rotor e  $d$  o diâmetro de uma pá e por fim o  $e$  corresponde á distância entre as partes interiores das pás do rotor, que podemos ver na Figura 13.

O alongamento é dado por:

$$\alpha = \frac{H}{D} \quad (7)$$

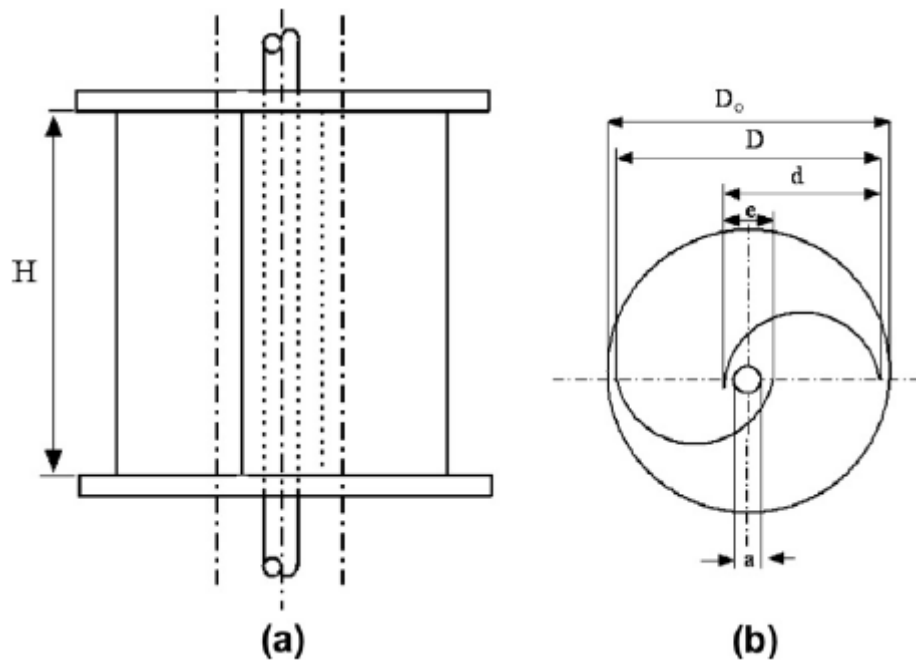


Figura 13-Esquema de um rotor de Savonius. a) Vista frontal; b) Vista de topo

Neste trabalho experimental foi utilizado um tacómetro para medir as rotações das pás e um anemómetro para medir a velocidade do vento obtida no túnel do vento.

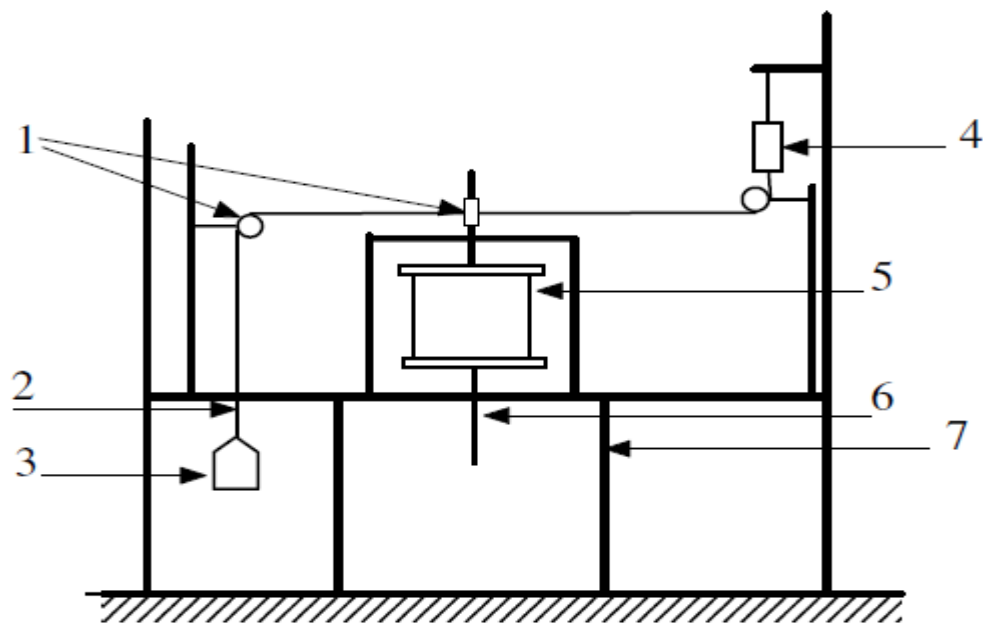


Figura 14-Rotor de Savonius com o sistema de medição de binário;

Legenda: 1: polias; 2: fio de nylon; 3: Objeto com massa  $m$ ; 4: Balança de mola 5: rotor de Savonius; 6: eixo do rotor; 7: estrutura metálica.

O cálculo do  $C_p$  é efetuado da mesma forma que na equação (4) sendo que a única diferença é o modo como se calcula o binário a que está sujeito o eixo para que depois se possa calcular a potência.

O binário é calculado através da força que atua nas polias que é obtida através da seguinte equação.

$$F = (m - s) \cdot g \quad (8)$$

Em que  $m$  é a massa do objeto (3) em kg,  $s$  é a leitura da balança de mola em kg e  $g$  a aceleração gravítica.

Nesta experiência, para um rotor de Savonius com razão de sobreposição ( $\beta$ ) igual a zero e alongamento ( $\alpha$ ) de 0,5 e com uma configuração mais usual de duas pás, obteve-se um coeficiente de potência de 0,09 quando as velocidades do vento no túnel de ensaios era 11 m/s. Para um rotor de Savonius com três pás obteve-se um coeficiente máximo de 0.05 também para uma velocidade de vento no túnel de ensaios de 1m/s e para

finalizar obteve-se um coeficiente de potência máximo de 0.045 para um rotor de Savonius com quatro pás nas mesmas condições de velocidade de vento no túnel.

W.A. El-Askary et al 2015 [18] fizeram um trabalho de modelação de um rotor de Savonius com o objetivo de controlar a direção do vento à entrada e saída do mesmo. Sendo um rotor Savonius constituído por uma pá com um lado côncavo e outro convexo relativamente à direção do vento, o objetivo deste trabalho foi direcionar o vento somente para a pá côncava diminuindo assim a força que o vento exerce sobre a pá cujo lado é convexo e assim diminuiu o momento de força contrário ao sentido de rotação do rotor.

Este estudo tem em conta três designs diferentes de direcionamento do vento sendo eles classificados como design I, design II e design III, (Figura 15).

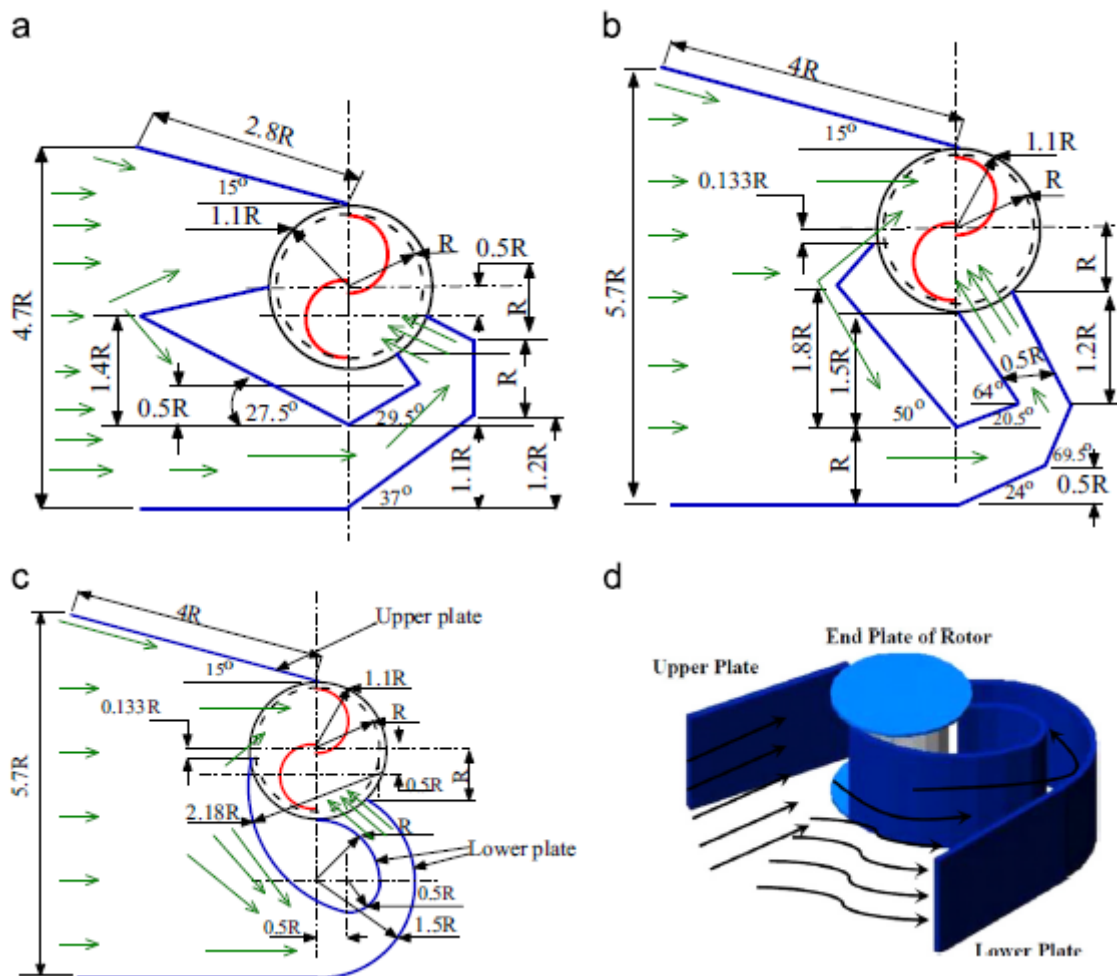


Figura 15 - a) Design I, b) Design II, c) Design III d) Geometria Design III [18]

A simulação foi efetuada com rotores com alongamento 1 e razão de sobreposição 0,15.

Os coeficientes de potência e de binário foram mais elevados para o design III do que para os rotores convencionais e os restantes designs. Sendo o coeficiente de potência máximo de 0,52 para  $\lambda$  de 1,1, também se verificou que se consegue obter valores de potência para valores maiores de  $\lambda$ .

Relativamente à velocidade do ar e sua dispersão ao redor do rotor foram feitas algumas simulações neste trabalho de modelação. Os seus autores concluíram que um rotor de Savonius tradicional produz uma perturbação menor no meio envolvente do que o novo design de rotor, este fenómeno pode ser importante ao nível das questões sonoras, uma vez que o ruído produzido pelas turbinas eólicas é um tema que merece alguma atenção.

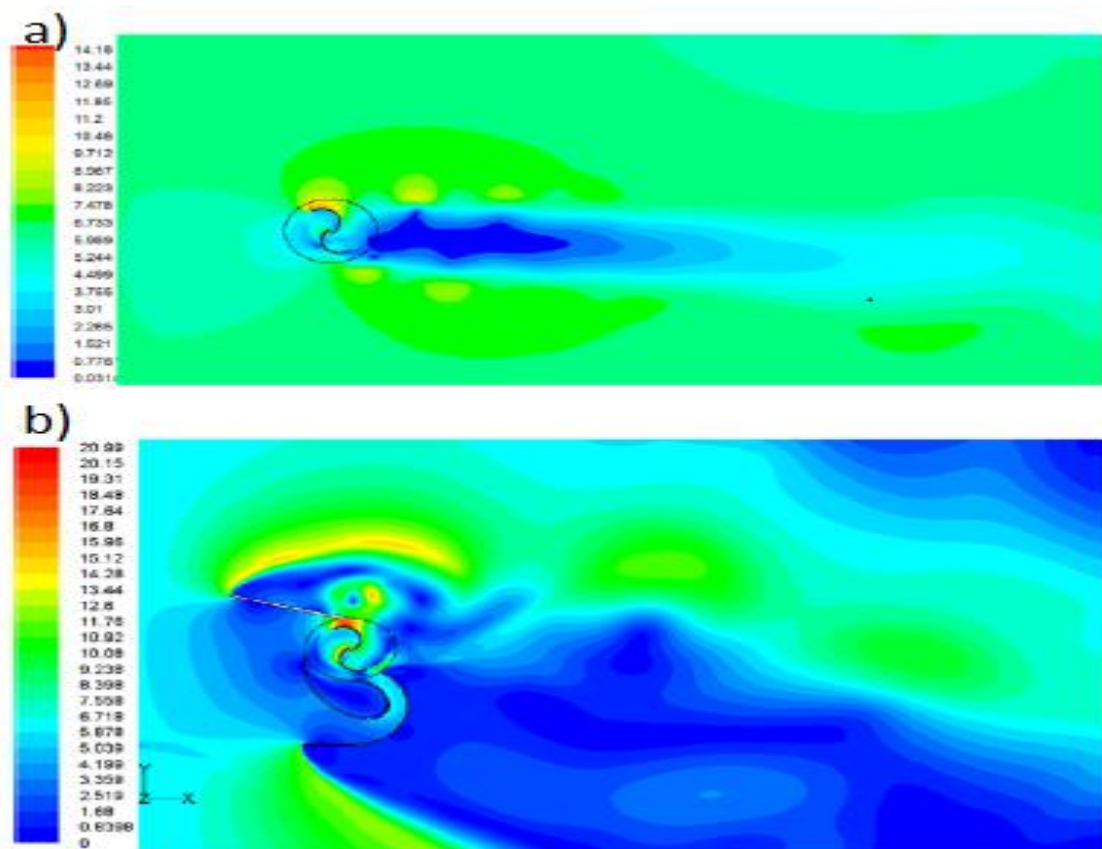


Figura 16-Contornos da velocidade (m/s) do ar ao redor do rotor de Savonius, a) convencional, b) Design III [18]



U.K. Saha, 2008 [19], realizaram um trabalho experimental em que analisaram catorze diferentes tipos de rotores de Savonius diferenciados pelas suas características geométricas número de estágios ou andares, tipo de pá, número de pás. Numa das experiências foram aplicadas pequenas válvulas nas pás de modo a que a força originada pelo vento quando encontra a parte côncava do rotor abre e quando encontra a parte convexa fecha. Isto faz com que a pressão aumente na parte côncava e assim diminui o efeito do binário que se opõe à direção de rotação do rotor. Relativamente às bases terminais, superior e inferior dos rotores estas apresentam um diâmetro 10% maior que o diâmetro do rotor.

Os autores concluíram que a válvula implementada no rotor de dois estágios e três pás helicoidais conduz à obtenção de um maior coeficiente de potência máxima (Tabela 1).

Tabela 1-Resultados para os diferentes rotores.[19]

Sistema de rotor	Nº de pás	Tipo de pá	Altura da pá	$\alpha$	Área projetada	Velocidade do vento (m/s)	Coeficiente máximo de potência
Um-estágio	2	Semicircular	0,173	1,58	0,0377	8,23	0,18
		Helicoidal					0,19
	3	Semicircular					0,15
		Helicoidal					0,16
Dois-estágios	2	Semicircular	0,122	1,58	0,0377	7,30	0,29
		Helicoidal					0,31
	3	Semicircular					0,26
		Helicoidal					0,28
Três-estágios	2	Semicircular	0,100	1,58	0,0377	8,23	0,23
		Helicoidal					0,24
	3	Semicircular					0,20
		Helicoidal					0,21
Dois-estágios com válvula	3	Semicircular	0,122	1,58	0,0377	7,3	0,31
		Helicoidal					0,32

K. Sharma et al, 2010 [20], desenvolveram um trabalho experimental com o intuito de aumentar o desempenho de um rotor de Savonius através da otimização do seu design [20]. Os autores propuseram estudar rotores de Savonius com dois estágios com as hélices dos dois rotores desfasadas 90 graus. Tendo analisado quatro rotores com razão de sobreposição 9,37%, 12,37%, 17,87% e 19,87%.

Tabela 2 - Resultados obtidos.[19]

<b>Tipo de rotor</b>	<b>Razão de sobreposição (%)</b>	<b>Coeficiente de potência máximo(Cp)</b>	<b>Coeficiente de binário máximo (Ct)</b>	<b>Coeficiente de velocidade periférica</b>
Rotor dois estágios	9,375	0,514	0,744	0,695
	12,375	0,453	0,658	0,688
	16,875	0,450	0,640	0,700
	19,875	0,438	0,627	0,698

Os autores analisaram que os coeficientes de potência diminuem com o aumento da razão de sobreposição, sendo que o seu máximo global é 0,514 e 0,744. Relativamente ao coeficiente de velocidade periférica verifica-se que se aproxima dos 0,7 em todos os casos para os valores máximos dos coeficientes Cp e Ct.

## 2.1 Síntese do capítulo

Neste capítulo foram abordados vários trabalhos de avaliação experimental e teórica que apresentam estudos de diferentes rotores de Savonius que levam a conhecer diferentes parâmetros de avaliação do mesmo, o coeficiente de potência, coeficiente de binário, alongamento, razão de sobreposição, e coeficiente de velocidade periférica. Após este capítulo é possível elaborar uma montagem experimental de modo a fazer o estudo dos parâmetros de coeficiente de potência e coeficiente de binário.

### Capítulo 3 Metodologia e Métodos

Com o intuito de conhecer o desempenho de um rotor de Savonius em diferentes configurações foram realizados testes no túnel do vento do departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro. Os parâmetros laboratoriais recolhidos são a velocidade do vento dentro do túnel do vento, a velocidade de rotação das pás e ainda foi obtida a leitura da onda de fase que atravessa uma resistência do circuito em estrela. O circuito elétrico foi a metodologia escolhida para se conseguir calcular o binário do rotor e também a potência gerada pelo rotor. Sendo assim consegue-se calcular os coeficientes de binário e de potência do rotor de Savonius.

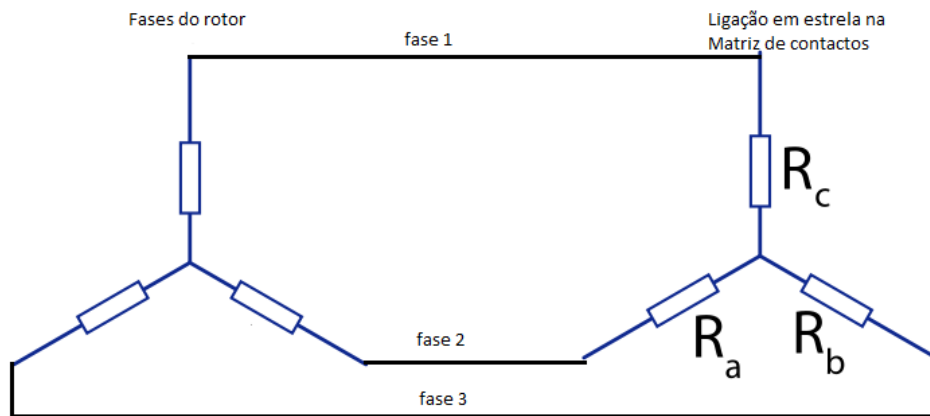


Figura 17-Circuito implementado nos terminais do rotor

A ligação em estrela representada na Figura 17 mostra as resistências, Ra Rb e Rc que apresentam o mesmo valor, no trabalho realizado elas têm valores de 22, 10, 4.7, 3.3, 1.5, 0.47 e 0.22  $\Omega$

Nos terminais destas resistências mede-se a onda de fase de cada uma das fases do rotor que são iguais, já que se apresentam resistências iguais ligadas aos terminais de cada

$$P = \frac{V_{eficaz}^2}{R_e} \text{ fase. Com as ondas de fase sabe-se a tensão de pico e a frequência de}$$

onda, com estas variáveis consegue-se calcular a potência dissipada na resistência através da equação(9).

(9)

Posto isto, a potência dissipada pelas três resistências é igual a três vezes a potência dissipada numa resistência.

Considera-se que a potência mecânica do rotor seria igual à potência elétrica produzida, se a eficiência do rotor fosse 100%.

Para calcular o binário do rotor adicionado ao sistema através do circuito elétrico, considera-se que a potência elétrica dissipada é igual à potência mecânica e assim calcula-se o binário mecânico através da equação (10) .

$$P_{mecânica} = T \cdot \omega \quad (10)$$

### **3.1 Descrição da turbina e do gerador**

Na realização deste trabalho experimental utiliza-se um rotor de Savonius que apresenta as suas duas pás subdivididas em quatro subsecções mais pequenas, que têm como característica o facto de poderem rodar em torno de um eixo localizado na sua extremidade e que lhes possibilita abrir para o lado interior das pás. Esta característica é nova relativamente aos rotores de Savonius tradicionais.

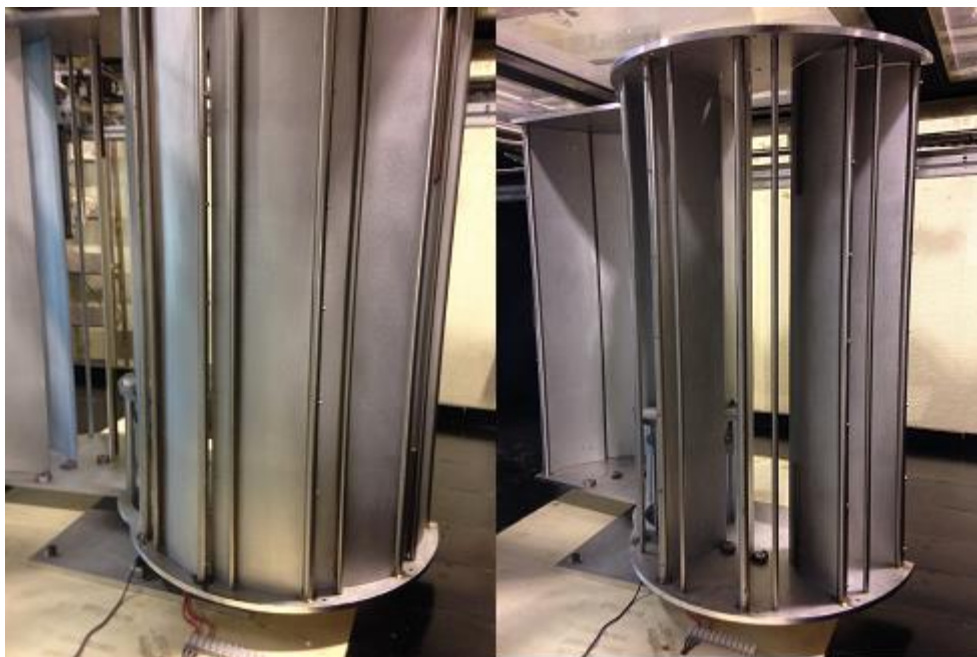


Figura 18-Rotor de Savonius pás fechadas e pás abertas

Como poderemos verificar na Figura 18 o rotor apresenta-se com as pequenas secções fechadas no lado esquerdo e abertas na parte direita da figura.



Figura 19-A-Centro aberto; B-Centro fechado

A Figura 19 representa uma imagem de topo das pás principais em duas diferentes configurações, a configuração A é a de centro aberto, como se pode verificar as pás apresentam um pequeno espaço entre as extremidades centrais das pás e a configuração B designada por centro fechado as pás encontram as suas extremidades alinhadas no centro do rotor de Savonius.

Este trabalho experimental foi feito com base em quatro configurações diferentes deste rotor de Savonius.

A primeira dessas configurações é de centro fechado e pás abertas, ou seja, as pás são unidas no seu centro de modo em que não haja passagem de ar no centro do rotor de Savonius e para que as pás tenham as subsecções livres para abrir consoante a rotação.

A segunda confirmação é composta pelo centro fechado e pás fechadas em que diferença relativamente à anterior é o facto de as subsecções estarem presas e assim se manterem sempre fechadas ao longo da rotação do rotor.

A terceira configuração é de centro aberto e pás abertas onde entre as duas pás há passagem de vento, e as pás têm as subsecções livres para abrir após rotação do rotor.

A quarta configuração de centro aberto e pás fechadas, é a configuração mais usual do rotor de Savonius, o centro é igual à configuração anterior, mas as subsecções das pás estão fechadas.

O rotor de Savonius foi desenhado pelo Professor Doutor António Completo sendo apresentada na Figura 20 a base superior do rotor. De acordo com a Figura 19 verifica-se que o diâmetro do rotor é de 870 mm e ainda o espaço no centro entre pás é de 130 mm. A altura do rotor é de 824 mm.

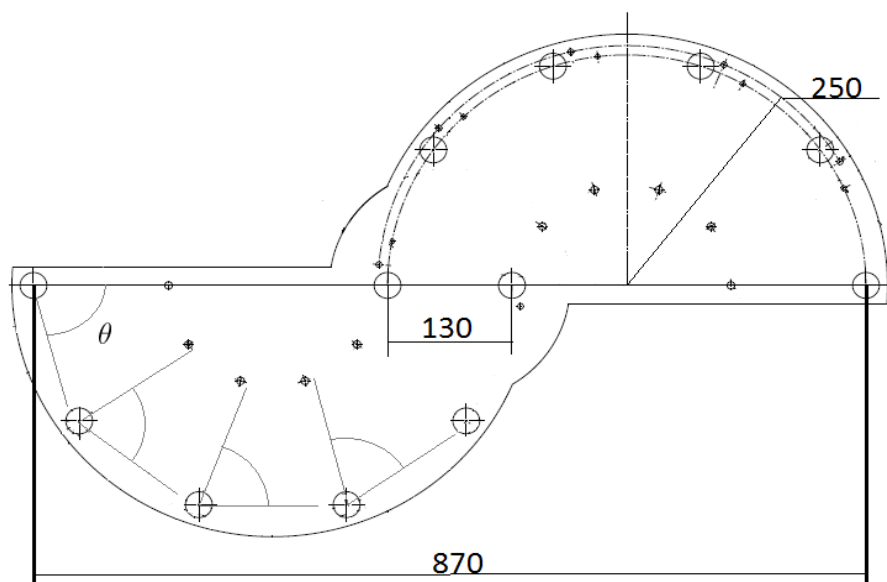


Figura 20-Base superior do rotor de Savonius

A razão de sobreposição calculada com o auxílio da equação (6) do rotor de Savonius na configuração de centro aberto e pás fechadas é de 0,29 e o alongamento calculado através da equação (7) é de 0,94.

As subsecções das pás são constituídas por alumínio tal como da base superior e inferior das pás. Os eixos de rotação das subsecções são de aço inox e os eixos que servem de batentes a estas subsecções são também de aço. O rotor possui uma massa de 40 kg.

Acoplado ao rotor de Savonius existe um gerador síncrono de ímanes permanentes igual ao apresentado na Figura 21, com 300 W de potência nominal, potência máxima 320 W, rotação nominal 450 rpm e rotação máxima 500 rpm O seu modelo é o yaf-300.



Figura 21-Gerador síncrono de ímanes permanentes

Este tipo de geradores é composto por um estator que contém os enrolamentos de bobinas (Figura 22) que por sua vez contém os ímanes permanentes.

O campo magnético provocado pelos ímanes e sua rotação induz corrente elétrica nas respetivas bobinas do estator.



Figura 22-Interior do gerador síncrono de ímanes permanentes

Neste gerador a frequência da tensão elétrica ( $f$ ) é representada em função do número de polos ( $p$ ) e do número de rotações por minuto ( $n$ ) como se verifica pela equação.[21].

$$f = \frac{p}{2} \frac{n}{60} \quad (11)$$

Este gerador serviu para que se pudesse saber os valores de potência elétrica produzida para as diferentes análises que foram feitas com as diferentes configurações do rotor de Savonius.



## 3.2 Descrição da instalação experimental

### Túnel de Vento

O túnel do vento utilizado é um túnel de circuito aberto que apresenta um comprimento de 12,2 m e secção de ensaios de 6,5x1,5x1,0 m

O túnel possui um variador de frequência que serve para controlar o ventilador que gera o fluxo de ar no interior do túnel.

Ao nível das velocidades de vento obtidas dentro do túnel, estas podem chegar próximas do 11 m/s para esta experiência de modo a estar salvaguardada a segurança das condições físicas do túnel.



Figura 23-Túnel do Vento

### Variador de frequência

O variador de frequência utilizado no ventilador do túnel de vento é o modelo freqrol-A200 da Mitsubishi.



Figura 24-variador de frequência

### Manómetro

Para obter diferenças de pressão entre o interior do túnel e o seu exterior foi utilizado um manómetro que obtém a diferença de pressão em mm H<sub>2</sub>O (Figura 25).

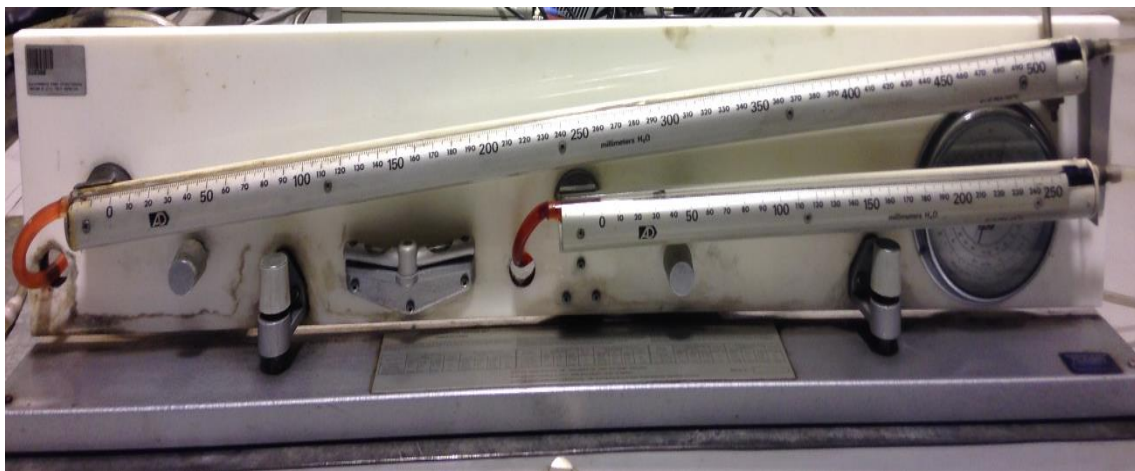


Figura 25 - Manómetro

### Medidor de Rpm

Através de um conta-quilómetros foi possível medir as rotações por minuto das pás da nossa turbina.



Figura 26-Medidor de velocidade de rotação

O sensor do conta-quilómetros foi aplicado a uma distância de 0,165 m do centro do rotor e assim através da equação (12) podemos calcular a velocidade angular das pás em rotações por minuto multiplicando a velocidade linear no conta quilometro pela constante 16,08.

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{\frac{v}{3,6}}{0,165} * \frac{60}{2\pi} = 16,08v \quad (12)$$

### Matriz de contactos

A matriz de contactos também designada de placa branca é uma matriz que é subdividida em outras matrizes que apresentam diferentes direções de pontos de contacto de corrente entre si. Podemos verificar segundo a Figura 27 que as matrizes exteriores, superior e inferior, formadas por duas linhas de pontos têm contacto na direção horizontal e as duas matrizes interiores têm contacto entre pontos na direção vertical.

Esta matriz serviu para ligar as resistências numa linha onde houvesse contacto para que se pudesse fazer a ligação em estrela (Figura 17).

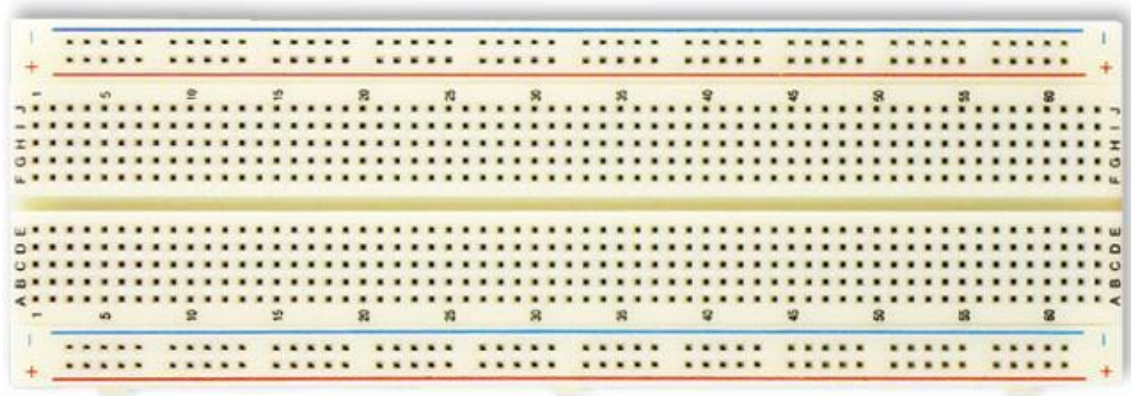


Figura 27-Matriz de contactos

### Osciloscópio

O osciloscópio utilizado (Figura 28) permite através do software PicoScope 6 obter as ondas, e ainda se pode adquirir algumas características da onda calculadas automaticamente através do software, tais como frequência de onda, valor de pico a pico e tensão eficaz.

Este osciloscópio permitiu ler a onda de tensão nos terminais de uma resistência ( $R_a$ ) do circuito implementado (Figura 17).

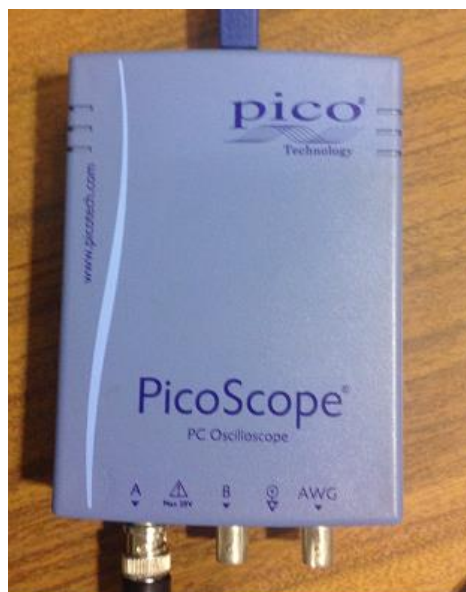


Figura 28-Osciloscópio

### Tubo de Pitot

O tubo de pitot é um medidor de diferença de pressão alinhado paralelamente á direção do escoamento que nos permite calcular a velocidade do escoamento dentro do túnel do vento através da equação (13) que é deduzida da equação de Bernoulli-

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (P_0 - P_s) \cdot 0,1}{\rho_{ar}}} \quad (13)$$

O tubo de Pitot tal como vemos na Figura 29 deve ser alinhado com a direção do escoamento.



Figura 29-Tubo de Pitot

### Resistências elétricas

Foram utilizadas resistências elétricas cerâmicas, tal como vemos na Figura 30, no trabalho experimental com 22Ω, 10Ω, 4.7Ω, 3.3Ω, 1.5Ω, 0.47Ω e 0.22Ω. Utilizou-se grupos de três resistências para se conseguir fazer uma ligação em estrela com os terminais do rotor.



Figura 30-Resistência elétrica

### **Termómetro**

É necessária a utilização de um termómetro para sabermos a temperatura ambiente e assim conseguirmos colocar nas nossas variáveis para cálculo da densidade do ar, que necessitamos para o cálculo da velocidade do ar.

### **3.3 Procedimento experimental**

Na realização do trabalho experimental utilizou-se quatro configurações diferentes como referido anteriormente e o procedimento estabelecido foi igual para as quatro configurações.

O procedimento laboratorial inicia-se com a verificação da temperatura do ar e a pressão atmosférica para que se possa saber a densidade do ar, que é uma variável de cálculo da equação da velocidade do ar no interior do túnel.

Sabe-se que o manómetro nos transmite a diferença de pressão dentro do túnel em mmH<sub>2</sub>O.

Nesta fase pode-se calcular a velocidade do vento dentro do túnel.

O rotor de Savonius está montado na zona de ensaios do túnel e acoplado a este está o gerador eléctrico sendo que a sua cabelagem vem dar ao exterior do túnel para que se possa fazer a ligação do circuito eléctrico.

O circuito eléctrico é feito na matriz de contactos aplicando-se grupos de três resistências iguais com os valores de 20,10,4.7,3.3,1.5,0.47,0.22 $\Omega$ . Estes grupos estão com uma das pontas em contacto entre si para que se possa fazer a ligação em estrela (Figura 17).

A Figura 31 representa o efeito prático da ligação em estrela na matriz de contactos.



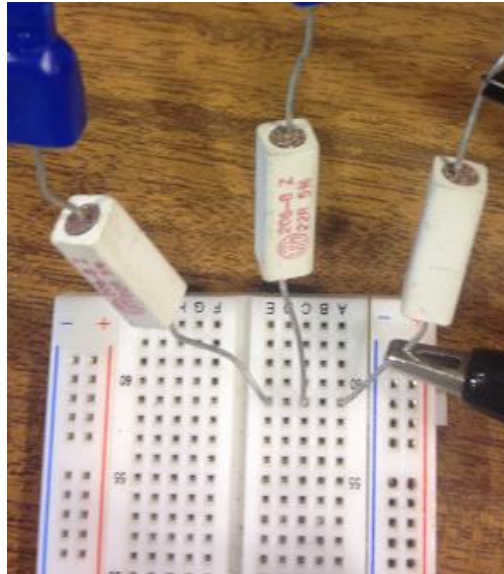


Figura 31-Ligação em estrela

O variador de frequência liga-se a uma frequência de 15 hz que corresponde a uma velocidade de vento de aproximadamente 4 m/s. Posto isto o gerador elétrico começa a debitar energia elétrica que será dissipada nas resistências elétricas que estão ligadas à matriz de contactos. As fases do gerador síncrono são conectadas aos grupos de resistências elétricas de modo sequencial, isto é, as fases do gerador ligaram-se primeiro ao grupo de três resistências de 20  $\Omega$  e por último às resistências de 0,22  $\Omega$ . Para cada grupo de resistências é feito a leitura das ondas de fase com o auxílio do osciloscópio.

Utilizou-se frequências de 15, 20, 25, 30,35,40,45,47 hz no variador de frequências para se obter diferentes velocidades de vento desde os 4 m/s até aos 11 m/s e fez-se a leitura das ondas de fase para cada um dos grupos de resistências através do procedimento descrito anteriormente.





## Capítulo 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Determinação de Coeficiente de potência

No gráfico do coeficiente de potência para a resistência de  $0,47 \, \Omega$  (Figura 32) mostra-se o resultado obtido para as quatro configurações diferentes em função da velocidade do vento dentro do túnel do vento.

Foi escolhido este gráfico porque apresenta os valores mais elevados de coeficiente de potência embora tenham sido feitos os gráficos para as restantes resistências impostas ao rotor, apresentados no anexo B.

Para a configuração com centro fechado e pás abertas foram feitos testes desde a velocidade de 4,4 até 6,8 m/s e para a configuração centro fechado pás fechadas foram feitos testes a partir da velocidade de 4,4 até 10,9 m/s e para as restantes configurações foram feitos testes de 3,9 até 10,8 m/s. No caso da configuração centro fechado e pás abertas, as medidas foram restringidas a estes valores de velocidades porque devido a questões mecânicas do rotor, para velocidades superiores ficava com uma das subsecções sempre abertas e não fechava como esperado. Supostamente para velocidades superiores a 6,8 m/s a velocidade de rotação do rotor será demasiado elevada para que as subsecções abram e fechem a cada ciclo de rotação.

Verifica-se que a configuração com centro fechado e pás fechadas apresenta valores mais baixos de coeficiente de potência relativamente às restantes configurações.

A configuração com centro fechado e pás abertas apresenta valores próximos de coeficiente de potência aos valores obtidos para o centro aberto e pás abertas, isto para os valores restritos de velocidades do vento entre 4,4 e 6,8 m/s,

Relativamente à configuração com centro aberto e pás abertas, para valores de velocidades do vento superiores a 8,1 m/s apresenta valores de coeficiente de potência semelhantes à configuração centro aberto e pás fechadas. Isto porque tal como foi dito anteriormente as subsecções das pás acabam por não abrir para velocidades de rotação do rotor elevadas, ou seja, a configuração com centro aberto e pás abertas fica

fisicamente com as mesmas características da configuração com centro aberto e pás fechadas.

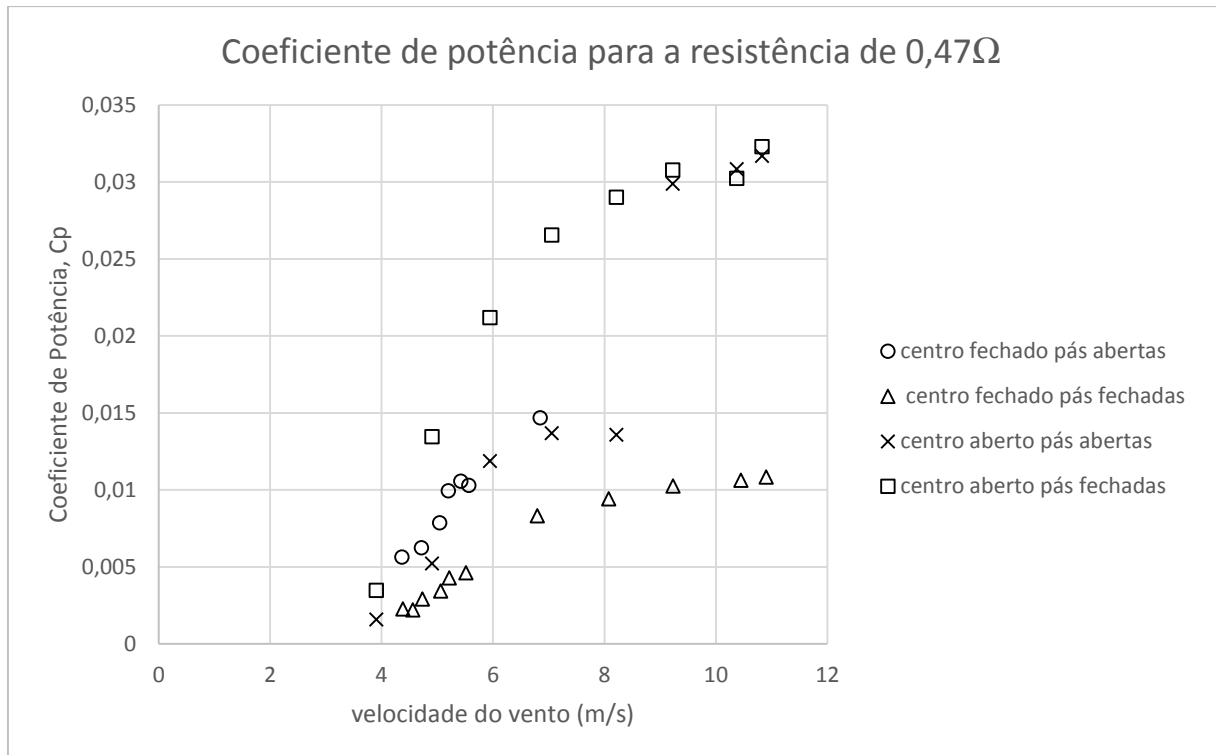


Figura 32-Coeficiente de potência em diferentes configurações

## 4.2 Determinação de Coeficiente de binário

O coeficiente de binário (Figura 33) máximo é obtido pela configuração centro aberto e pás fechadas para ventos da ordem dos 7 m/s. Verifica-se que os resultados de coeficiente são semelhantes entre as configurações centro aberto e pás fechadas e centro aberto e pás abertas, isto porque, como já foi referido anteriormente as pás que são compostas por subsecções, para velocidades de vento da ordem dos 9 m/s ou superior, deixam de abrir após cada rotação do rotor e este acaba por obter resultados semelhantes à configuração centro aberto e pás fechadas.

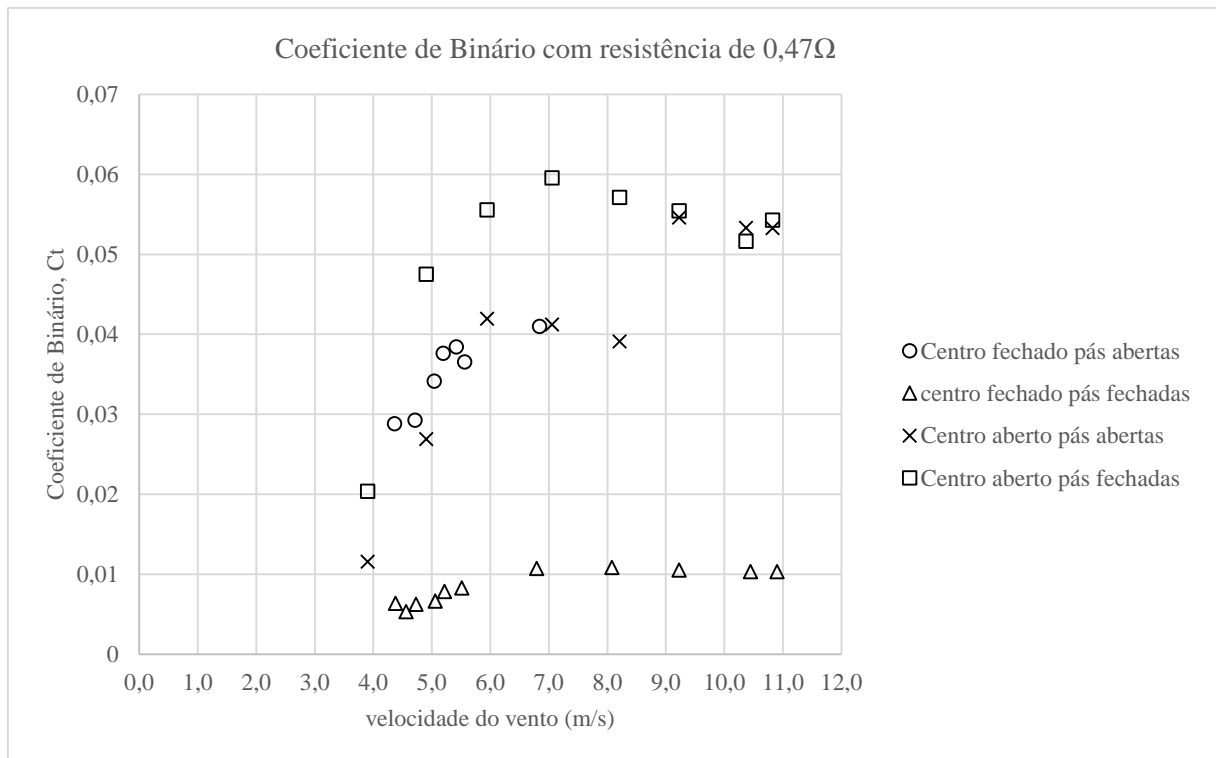


Figura 33-Coeficiente de Binário em diferentes configurações

### 4.3 Determinação do Coeficiente de velocidade periférica

O coeficiente de velocidade periférica (Figura 34) apresenta-se como variável dependente em função da velocidade de rotação. Como podemos ver na equação (3) esta variável depende da velocidade linear da extremidade das pás logo depende das rotações do rotor e também depende da velocidade de vento. O gráfico foi escolhido para uma resistência de  $22\ \Omega$  isto porque é onde o coeficiente de velocidade periférica encontra os seus valores mais elevados

Pode-se verificar que os pontos do gráfico onde as configurações têm o centro fechado obtêm valores mais baixos de coeficiente de velocidade periférica ( $\lambda$ ) comparando com os valores das configurações com centro aberto. Verifica-se também que existem dois conjuntos diferentes de pontos os relativos ao centro aberto e outro relativamente ao centro fechado.

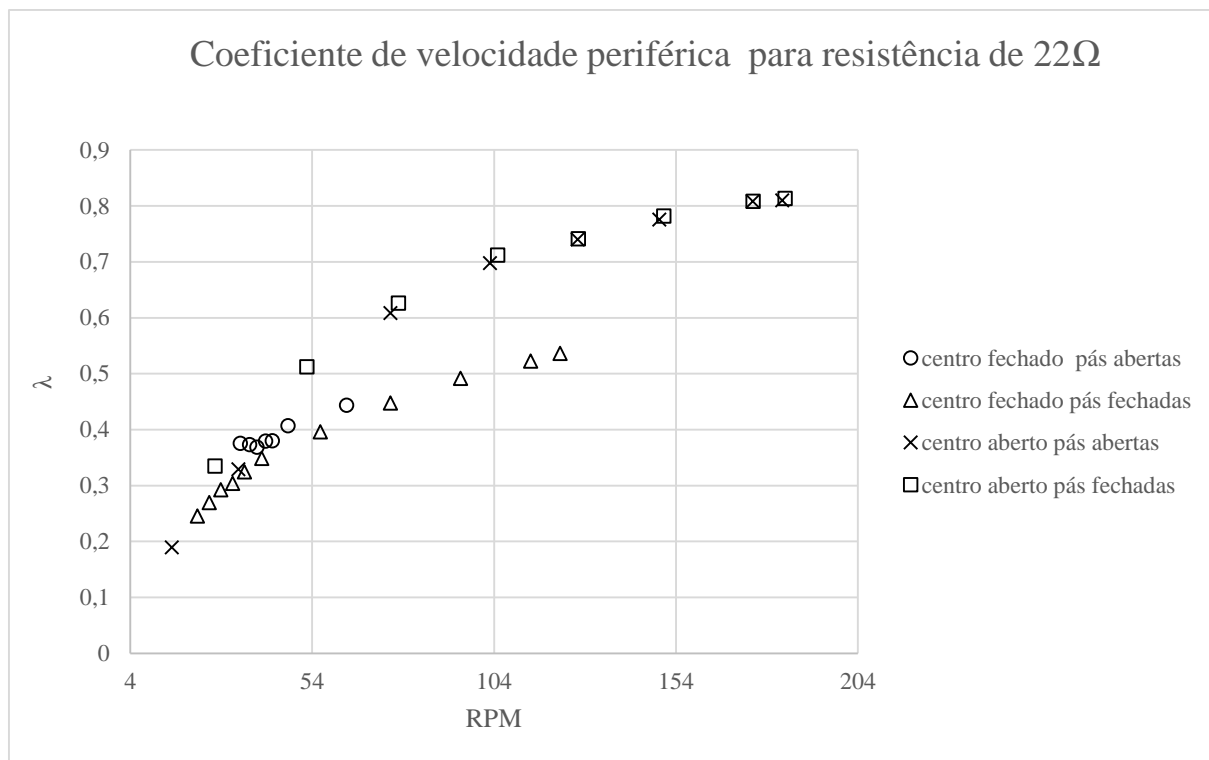


Figura 34- Coeficiente de velocidade periférica em função das rotações

#### 4.4 Determinação da Velocidade de rotação em função da velocidade do escoamento gasoso

Ao analisar-se os resultados obtidos para as rotações em função da velocidade do escoamento (Figura 35) verifica-se que estes apresentam rotações máximas da ordem das 180 rpm, ou seja, não foi atingida a velocidade nominal de 450 rpm do gerador elétrico. Verifica-se que as configurações com centro aberto obtêm rotação mais elevada comparando com as outras configurações, isto para velocidades de vento superiores a 6 m/s.

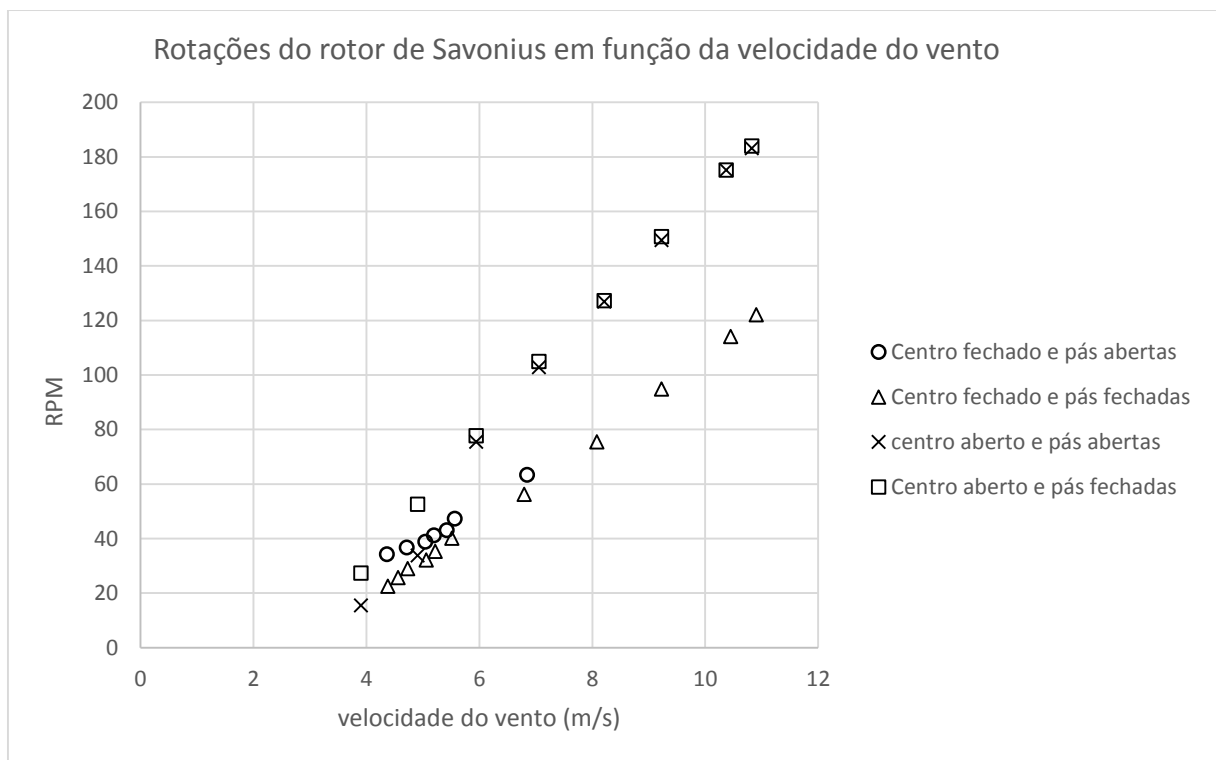


Figura 35-Rotações nas diferentes configurações

#### 4.5 Comparação de resultados para diferentes geometrias

O comportamento do coeficiente de binário em função do coeficiente de velocidade periférica ( $\lambda$ ) para as diferentes resistências colocadas no circuito está representado na Figura 36. Pode-se verificar que o coeficiente de binário máximo é atingido no circuito onde a resistência atribuída é a de 0,47 $\Omega$ . Este valor tem um coeficiente de velocidade

periférica ( $\lambda$ ) de 0,608. Se verificarmos o valor de coeficiente de binário vai atingindo valores mais elevados à medida que vamos diminuindo a resistência no circuito, isto acontece uma vez que a potência calculada através da equação (9) depende do valor da resistência, ou seja, se considerarmos valores de diferença de potencial e velocidade angular constantes a potência vai diminuir quando a resistência for menor e por consequência o binário vai aumentar. Logo de acordo com a equação (5) referente ao coeficiente binário, este irá diminuir uma vez que o denominador apresenta variáveis que são constantes de ensaio para ensaio.

De acordo com a Figura 36 verifica-se que os coeficientes de binário máximo foram atingidos para todas as resistências utilizadas uma vez que os pontos verificam uma subida e uma descida de valor de Coeficiente de binário ( $C_t$ ) ao longo do gráfico.

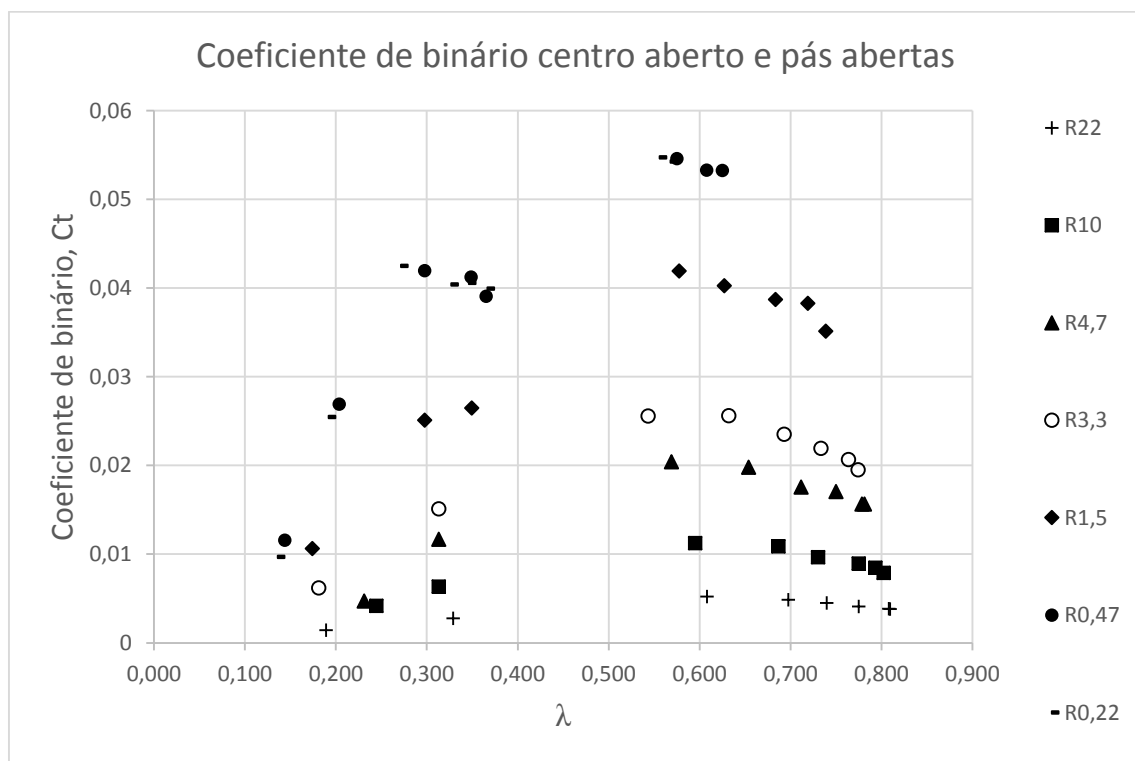


Figura 36-Coeficiente de binário para as diferentes resistências no centro aberto e pás abertas

O coeficiente de potência obtido para a configuração de centro aberto e pás fechadas está representado na Figura 37. No geral verifica-se que o coeficiente de potência aumenta à medida que vamos inserindo resistências de valor menor no circuito.



valor das resistências. Pode-se verificar que o máximo obtido de coeficiente de binário ( $C_t$ ) é atingido para a resistência de  $0,47\Omega$ , para o valor de coeficiente de velocidade periférica de  $0,469$ . Os valores de coeficiente de velocidade periférica para o coeficiente de binário ( $C_t$ ) máximo em cada resistência vão diminuindo, sendo que o máximo obtido para a resistência de  $22\Omega$  é em coeficiente de velocidade periférica  $0,626$  superior ao valor obtido para as resistências de menor valor.

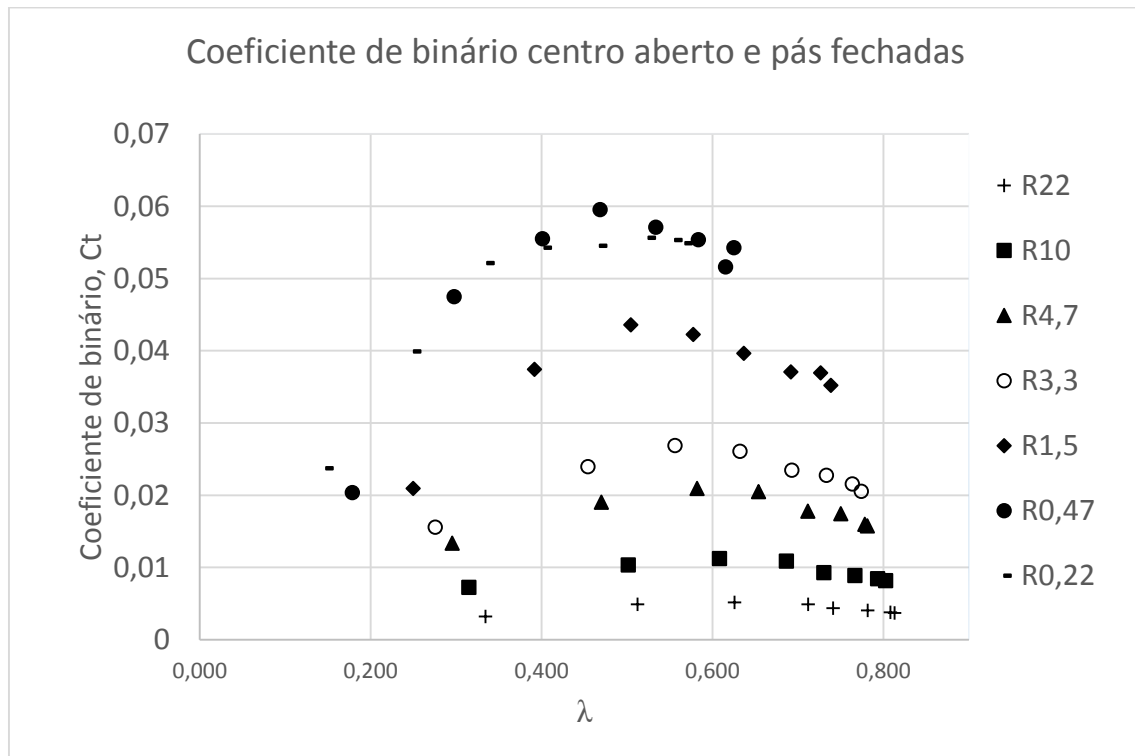


Figura 38-Coeficiente de binário para as diferentes resistências no centro aberto e pás fechadas

Os dados obtidos para o coeficiente de potência para a configuração do rotor com centro aberto e pás fechadas está representado na Figura 39. O  $C_p$  máximo nesta configuração é atingido nos dados experimentais da resistência de  $0,47\Omega$  e corresponde ao coeficiente de velocidade periférica de  $0,625$ . Os resultados obtidos para cada resistência para esta configuração mostram que o coeficiente de potência máximo apresentando pode não ser o máximo global para a configuração uma vez que os dados apresentam uma tendência de aumento de  $C_p$  ao longo do eixo do coeficiente de velocidade periférica.



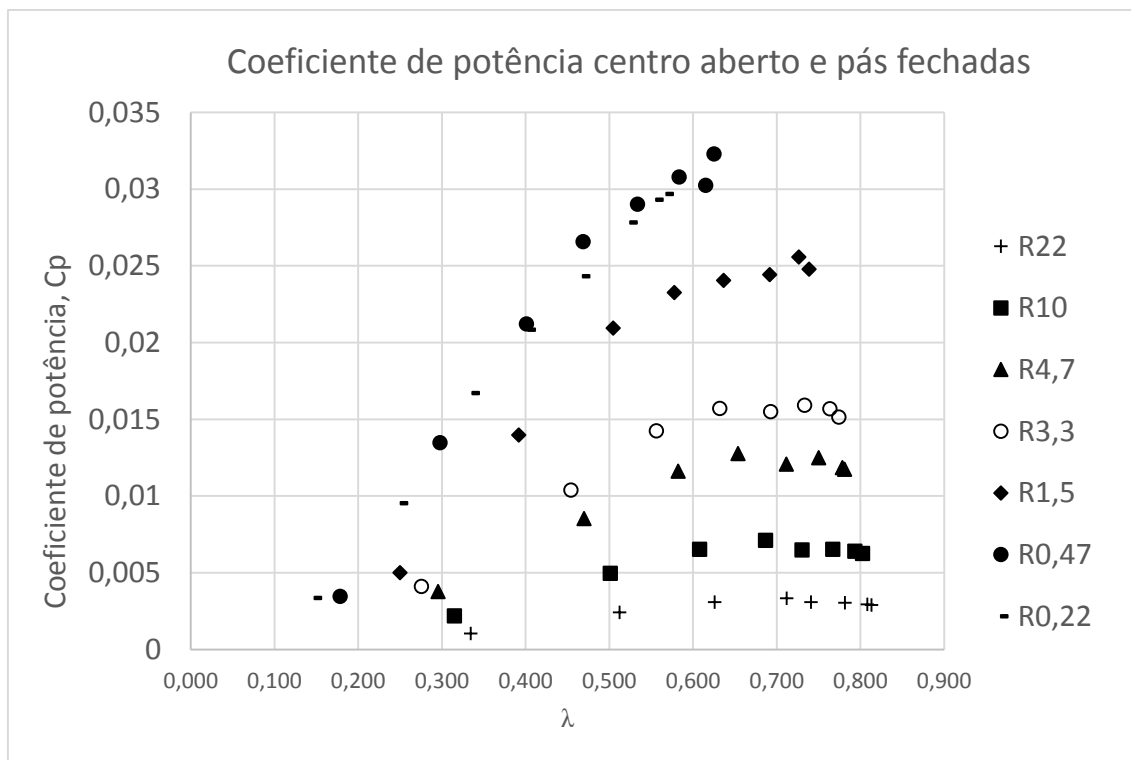


Figura 39-Coeficiente de potência para as diferentes resistências no centro aberto e pás fechadas

De seguida na Figura 40 apresenta-se os dados obtidos para o coeficiente de binário para a configuração do rotor de Savonius de centro fechado e pás abertas. Nesta configuração a velocidade as velocidades de vento utilizadas foram desde 4,4 a 6,8 por isso como temos uma amplitude pequena de dados não se pode concluir nada relativamente ao máximo binário. Na figura é possível ver que para as resistências de 0,47 e 0,22 obtemos uma maior extensão da localização dos pontos segundo o eixo do coeficiente de velocidade periférica. Isto acontece devido ao facto que para velocidades de vento mais baixas as resistências inseridas no circuito fazem com que o rotor tenha mais dificuldade em rodar logo apresenta rotações mais baixas e assim de acordo com a equação (3) referente ao coeficiente de velocidade periférica a velocidade linear na extremidade das pás vai ser tão pequena de modo que os valores de coeficiente de velocidade periférica também diminuam.

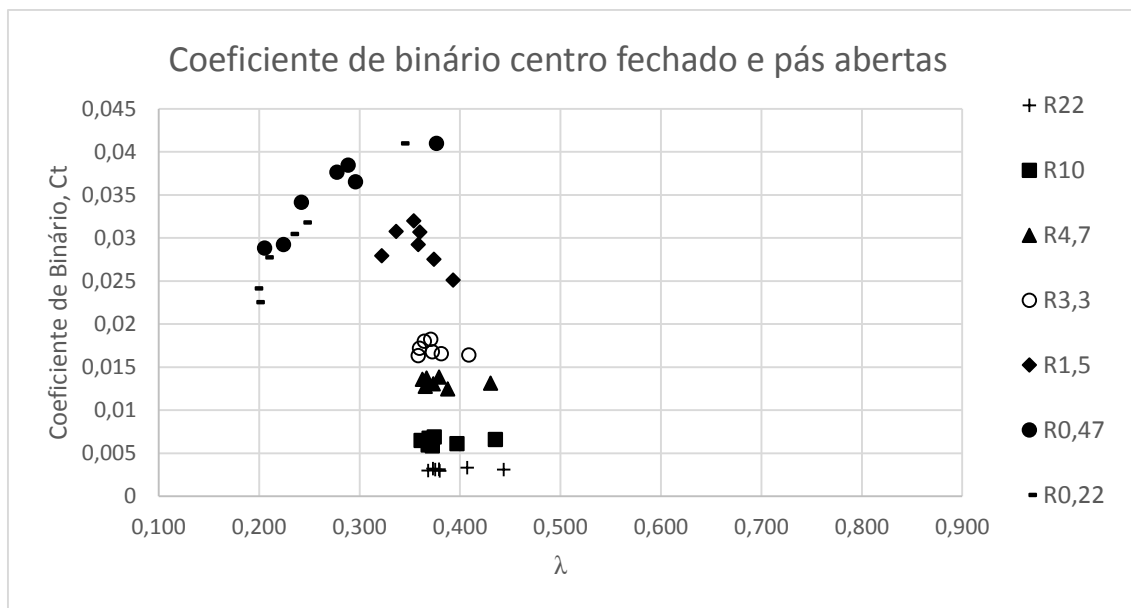


Figura 40-Coeficiente de binário para as diferentes resistências no centro fechado e pás abertas

O coeficiente de potência para a configuração de centro fechado e pás abertas (Figura 41) apresenta o seu máximo para as resistências de  $0,47\Omega$  mas verifica-se também que o gráfico está em fase ascendente ou seja não se conhece o máximo absoluto de  $C_p$ .

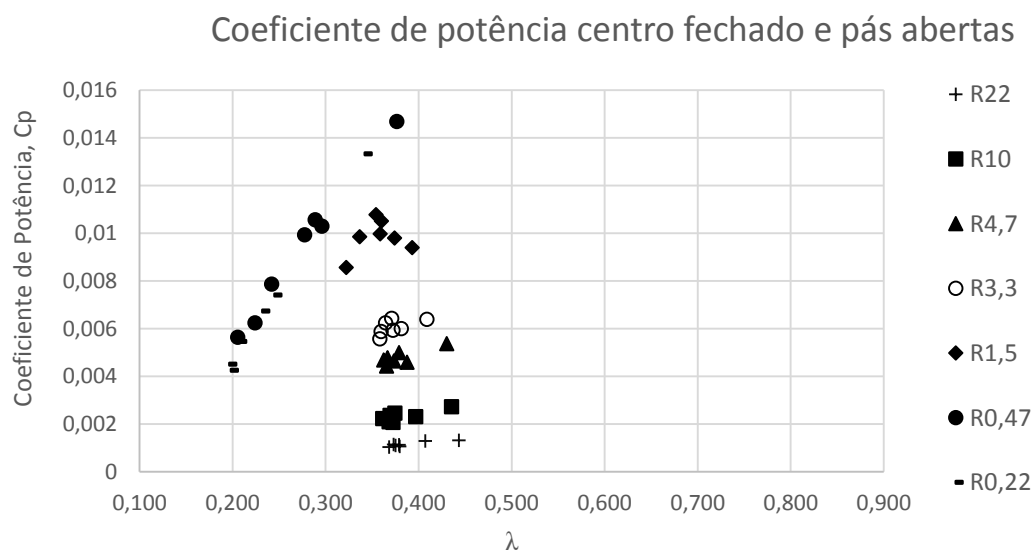


Figura 41-Coeficiente de potência para as diferentes resistências no centro fechado e pás abertas

Os resultados obtidos para o coeficiente de binário para a configuração de centro fechado e pás fechadas (Figura 42) apresenta o seu máximo para a resistência de  $0,47\Omega$  para um valor de coeficiente de velocidade periférica  $0,305$ .

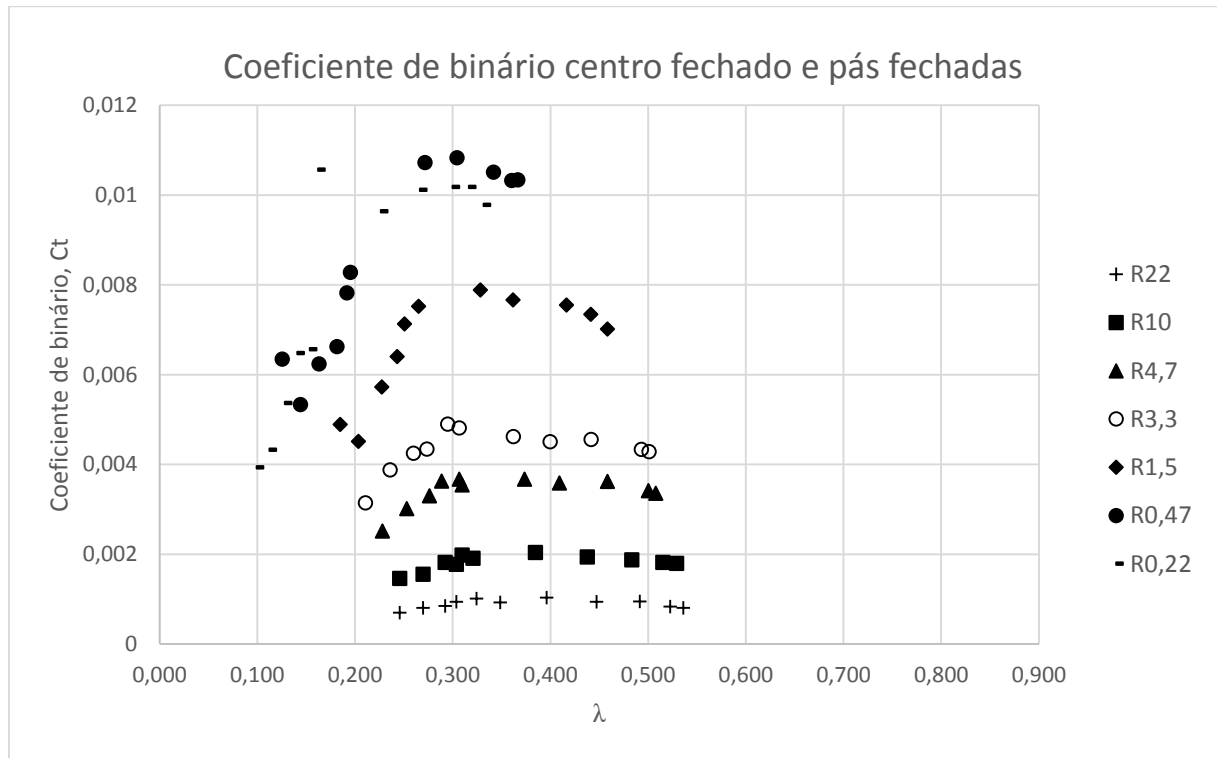


Figura 42-Coeficiente de binário para as diferentes resistências no centro fechado e pás fechadas

O coeficiente de potência para a configuração de centro fechado e pás fechadas (Figura 43) apresenta os seus valores máximos para a resistência de  $0,47\Omega$  sendo que para todas as resistências verificamos uma tendência para aumentar o coeficiente à medida que progredimos no eixo do coeficiente de velocidade periférica, o máximo do gráfico é encontrado para o coeficiente de velocidade periférica de  $0,367$ .

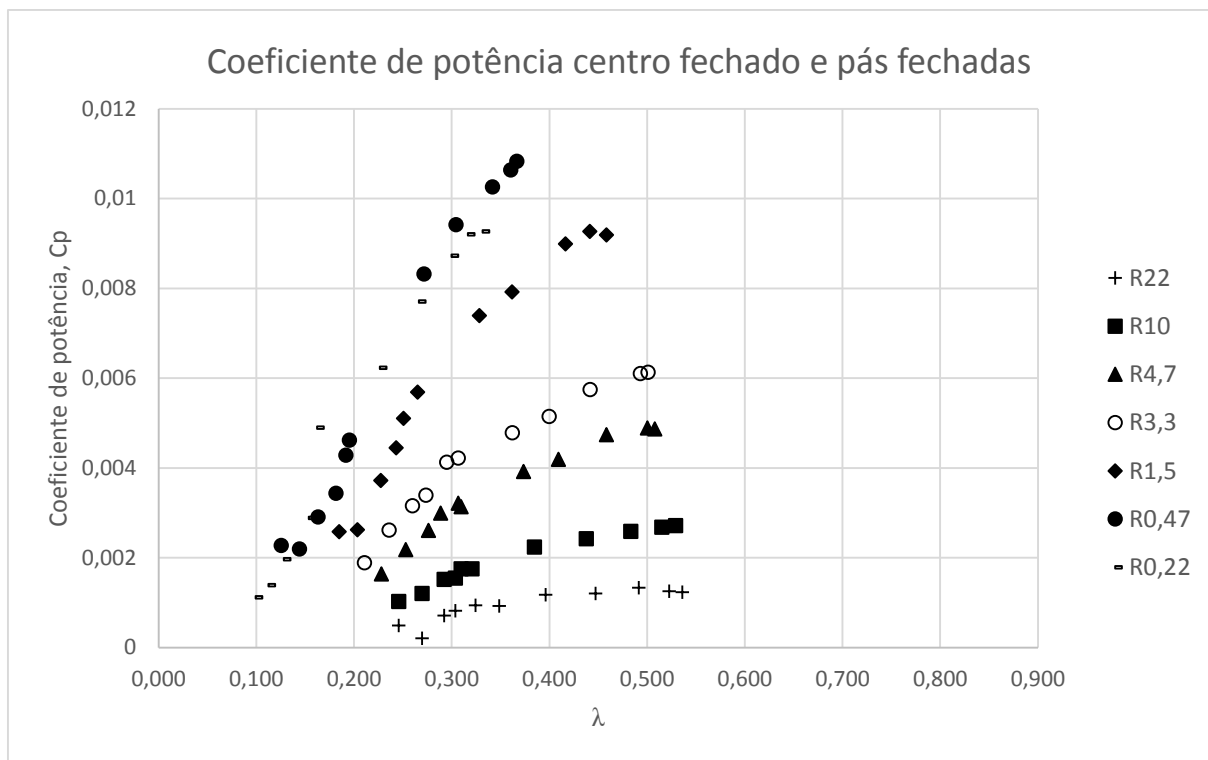


Figura 43-Coeficiente de potência para as diferentes resistências no centro fechado e pás fechadas

Relativamente ao coeficiente de potência obtido, verificou-se que a configuração do rotor de Savonius convencional, de pás fechadas e centro aberto obtém os melhores resultados relativamente às restantes, obtendo um  $C_p$  de 0,032 para um coeficiente de velocidade periférica de 0,625. Pode-se referir que outros autores como Roy e Saha ([22]) obtiveram para um rotor de Savonius convencional com alongamento igual a 1 e razão de sobreposição de 0,2 um máximo de coeficiente de potência 0,25 para um coeficiente de velocidade periférica de 0,74 e Hayasgi et al. apresentam resultados para rotor de Savonius convencional com alongamento igual a 1,25 e razão de sobreposição de 0,2 um máximo de coeficiente de potência de 0,16 para um coeficiente de velocidade periférica de 0,8.

Os resultados apresentados por outros autores têm em conta uma potência mecânica que é lida através da aplicação de forças graduais ao eixo do rotor de Savonius, para que assim se possa obter a potência mecânica efetiva do rotor, enquanto no trabalho experimental realizado nesta dissertação obtém-se a potência mecânica considerando

que esta é igual á potência elétrica dissipada pelas resistências, o que não é o caso já que o rotor elétrico apresenta um rendimento.

O coeficiente de binário obtido foi de 0,06 para um coeficiente de velocidade periférica de 0,469 para a configuração convencional que é relativamente baixo relativamente ao coeficiente binário obtido por Hayasgi et al. de 0,26 para um coeficiente de velocidade periférica de 0,42.



## Capítulo 5 Conclusões e Trabalho Futuro

A turbina apresenta um desempenho mecânico que permite produzir energia elétrica através de energia eólica em todas as configurações utilizadas.

Ao analisar-se as duas configurações com centro fechado verificou-se que a configuração de centro fechado e pás fechadas apresenta os valores mais baixos de potência elétrica produzida comparando a configuração de centro fechado e pás abertas. É possível concluir que a especificidade de se ter as subseções das pás livres é benéfica para a produção de energia elétrica neste caso.

Relativamente às duas configurações com centro aberto, a configuração de centro aberto e pás fechadas produz uma potência mais elevada relativamente à configuração de centro aberto e pás abertas exceto quando a velocidade de rotação do rotor é suficientemente grande para que as pás não abram e assim o rotor trabalha como se fosse a configuração de centro aberto e pás fechadas. Conclui-se que as pás abertas são prejudiciais à produção de energia elétrica comparando estas duas configurações.

No geral a obtém mais potência elétrica o rotor de Savonius (convencional) com centro aberto e pás fechadas e o rotor de Savonius na configuração de centro fechado e pás fechadas é o que produz menos potência elétrica.

Adicionalmente podem deixar-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Utilizar uma forma direta de calcular o binário produzido pelo eixo do rotor.
- Fazer ensaios ao ar livre para ver o desempenho da turbina sem os constrangimentos do túnel do vento.
- Utilizar material como PVC para a construção das pás da turbina de modo a reduzir a sua massa.





## Referências bibliográficas

- [1] R. M. Dutra, “Energia eólica principios e tecnologias,” 2008. [Online]. Available: [http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial\\_eolica\\_2008\\_e-book.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf).
- [2] Ammonit, “Energia Eólica,” 2016. [Online]. Available: <http://www.ammonit.com/pt/energia-eolica/energia-eolica>.
- [3] EWEA, “30 years of wind energy history.” [Online]. Available: <http://www.ewea.org/fileadmin/apps/30years/>. [Accessed: 28-Jun-2016].
- [4] U.S Energy information Administration, “International Energy Statistics.” [Online]. Available: <http://www.eia.gov/>. [Accessed: 28-Jun-2016].
- [5] Pordata, “Energias renováveis no balanço energético em Portugal.” [Online]. Available: <http://www.pordata.pt/>. [Accessed: 28-Jun-2016].
- [6] I. Al-bahadly, “Energy for Sustainable Development Building a wind turbine for rural home,” *ESD*, vol. 13, no. 3, pp. 159–165, 2009.
- [7] J. L. Menet, “A double-step Savonius rotor for local production of electricity: A design study,” *Renew. Energy*, vol. 29, no. 11, pp. 1843–1862, 2004.
- [8] J.-L. Menet and N. Bourabaa, “Increase The Savonius Rotor Efficiency Via a Parametric Investigation,” 2003.
- [9] R. Ricci, R. Romagnoli, S. Montelpare, and D. Vitali, “Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems,” *Appl. Energy*, vol. 161, pp. 143–152, 2016.
- [10] C. David and V. Ôlo, “Projecto de uma Turbina Savonius com Utilização de Componentes em Fim-de-Vida,” 2012.
- [11] J. Ramage, *Guia da Energia*, 1º edição. Lisboa, 2003.
- [12] Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia, “Decreto-Lei n.º 153/2014,” *Diário da República*, pp. 5298–5311, 2014.
- [13] Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia, “Portaria n.º 15/2015,” *Diário da República*, pp. 531–532, 2015.
- [14] Portaria n.º 14/2015, “Ministério do Ambiente Ordenamento do Território e Energia,” *Diário da República*, pp. 524–532, 2014.

- [15] Portal Energia, “Benefícios fiscais IRS em equipamentos de energias renováveis.” [Online]. Available: <http://www.portal-energia.com/beneficios-fiscais-irs-em-equipamentos-de-energias-renovaveis/>. [Accessed: 01-Nov-2016].
- [16] LusoSol, “Principais Características do Novo Regime Autoconsumo e Pequena Produção,” 2014. [Online]. Available: <http://www.lusosol.com/pdf/Autoconsumo2014.pdf>.
- [17] N. H. Mahmoud, A. A. El-Haroun, E. Wahba, and M. H. Nasef, “An experimental study on improvement of Savonius rotor performance,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 51, no. 1, pp. 19–25, 2012.
- [18] W. A. El-Askary, M. H. Nasef, A. A. AbdEL-hamid, and H. E. Gad, “Harvesting wind energy for improving performance of Savonius rotor,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 139, pp. 8–15, 2015.
- [19] U. K. Saha, S. Thotla, and D. Maity, “Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 96, no. 8–9, pp. 1359–1375, 2008.
- [20] K. . Sharma, R. Gupta, and A. Biswas, “Performance measurement of a two-stage two-bladed Savonius Rotor,” *Int. J. energy Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 116–121, 2010.
- [21] G. Rizzoni and J. Kearns, *Principles and Applications of Electrical Engineering*, 6<sup>o</sup> ed. 1993.
- [22] S. Roy and U. K. Saha, “Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine,” *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 117–125, 2015.

## Anexos

### Anexo A – Cálculo da velocidade do vento no túnel do vento

Tabela A. 1-Folha de cálculo Centro fechado e pás abertas

Centro fechado e pás abertas					
Frequência do variador	Temperatura	Pressão atm	Massa volúmica	Depressão	Velocidade do escoamento
f	T	Patm	$\rho$	dP	U
hz	°C	kPa	kg/m <sup>3</sup>	mm H <sub>2</sub> O	m/s
20,00	24,00	102,30	1,23	12,00	4,37
21,00	24,00	102,30	1,23	14,00	4,72
22,00	24,00	102,30	1,23	16,00	5,04
23,00	24,00	102,30	1,23	17,00	5,20
24,00	24,00	102,30	1,23	18,50	5,42
25,00	24,00	102,30	1,23	19,50	5,57
30,00	24,00	102,30	1,23	29,50	6,85

Tabela A. 2-Folha de cálculo Centro fechado e pás fechadas

Centro fechado e pás fechadas					
Frequência do variador	Temperatura	Pressão atm.	Massa volúmica	Depressão	Velocidade do escoamento
f	T	Patm	$\rho$	dP	v
hz	°C	kPa	kg/m <sup>3</sup>	mm H <sub>2</sub> O	m/s
20,00	26,00	102,20	1,22	12,00	4,38
21,00	26,00	102,20	1,22	13,00	4,56
22,00	26,00	102,20	1,22	14,00	4,73
23,00	26,00	102,20	1,22	16,00	5,06
24,00	26,00	102,20	1,22	17,00	5,22
25,00	26,00	102,20	1,22	19,00	5,51
30,00	25,00	102,40	1,23	29,00	6,80
35,00	25,00	102,40	1,23	41,00	8,08
40,00	25,00	102,40	1,23	53,50	9,23
45,00	27,00	102,20	1,22	68,00	10,45
47,00	27,00	102,20	1,22	74,00	10,90

Tabela A. 3-Folha de cálculo Centro aberto e pás fechadas

Centro aberto e pás abertas					
Frequência do variadora	Temperatura	Pressão atm	Massa volúmica	Depressão	Velocidade do escoamento
f	T	Patm	$\rho$	dP	v
hz	°C	kPa	kg/m <sup>3</sup>	mm H <sub>2</sub> O	m/s
15,00	27,00	102,20	1,22	9,50	3,91
20,00	27,00	102,20	1,22	15,00	4,91
25,00	27,00	102,20	1,22	22,00	5,94
30,00	27,00	102,20	1,22	31,00	7,06
35,00	27,00	102,20	1,22	42,00	8,21
40,00	27,00	102,20	1,22	53,00	9,23
45,00	27,00	102,20	1,22	67,00	10,37
47,00	27,00	102,20	1,22	73,00	10,83

Tabela A. 4-Folha de cálculo Centro aberto e pás fechadas

Centro aberto e pás fechadas					
Frequência do variador	Temperatura	Pressão atm	Massa volúmica	Depressão	Velocidade do escoamento
f	T	Patm	$\rho$	dP	U
hz	°C	kPa	kg/m <sup>3</sup>	mm H <sub>2</sub> O	m/s
15,00	27,00	102,20	1,22	9,50	3,91
20,00	27,00	102,20	1,22	15,00	4,91
25,00	27,00	102,20	1,22	22,00	5,94
30,00	27,00	102,20	1,22	31,00	7,06
35,00	27,00	102,20	1,22	42,00	8,21
40,00	27,00	102,20	1,22	53,00	9,23
45,00	27,00	102,20	1,22	67,00	10,37
47,00	27,00	102,20	1,22	73,00	10,83

Anexo B – Gráficos Coeficiente de Potência

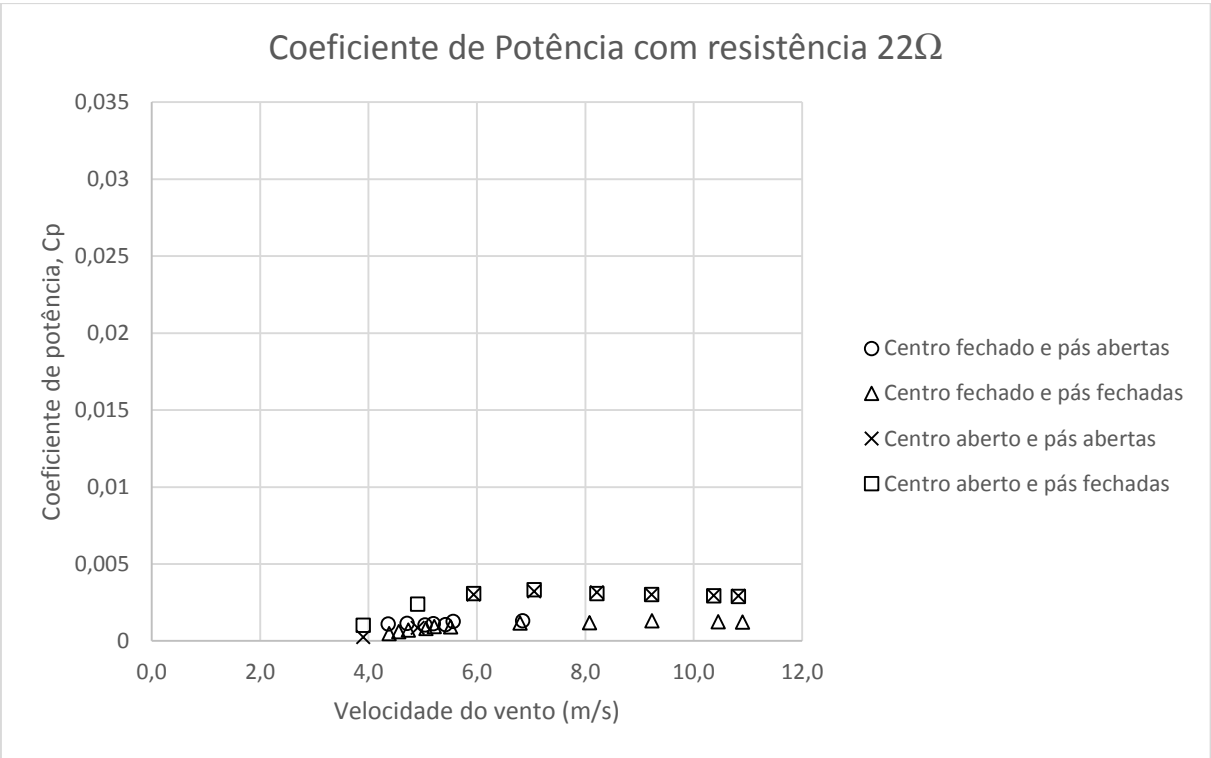


Figura B.1-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $22\Omega$

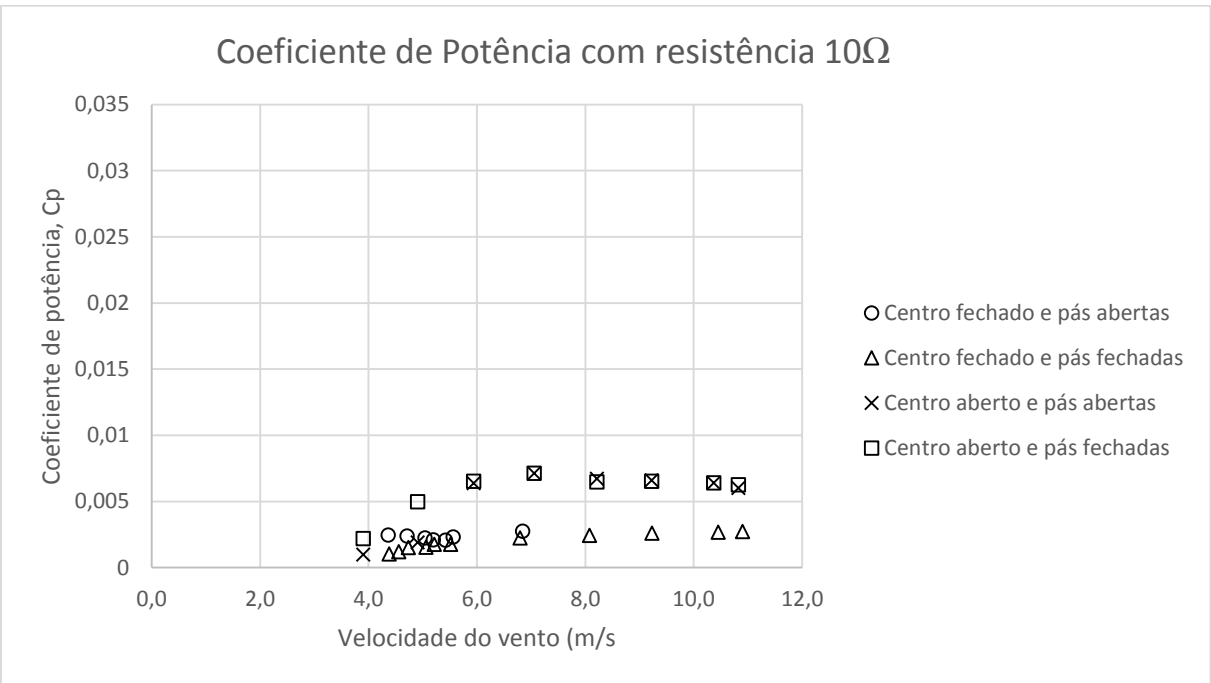


Figura B.2-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $10\Omega$

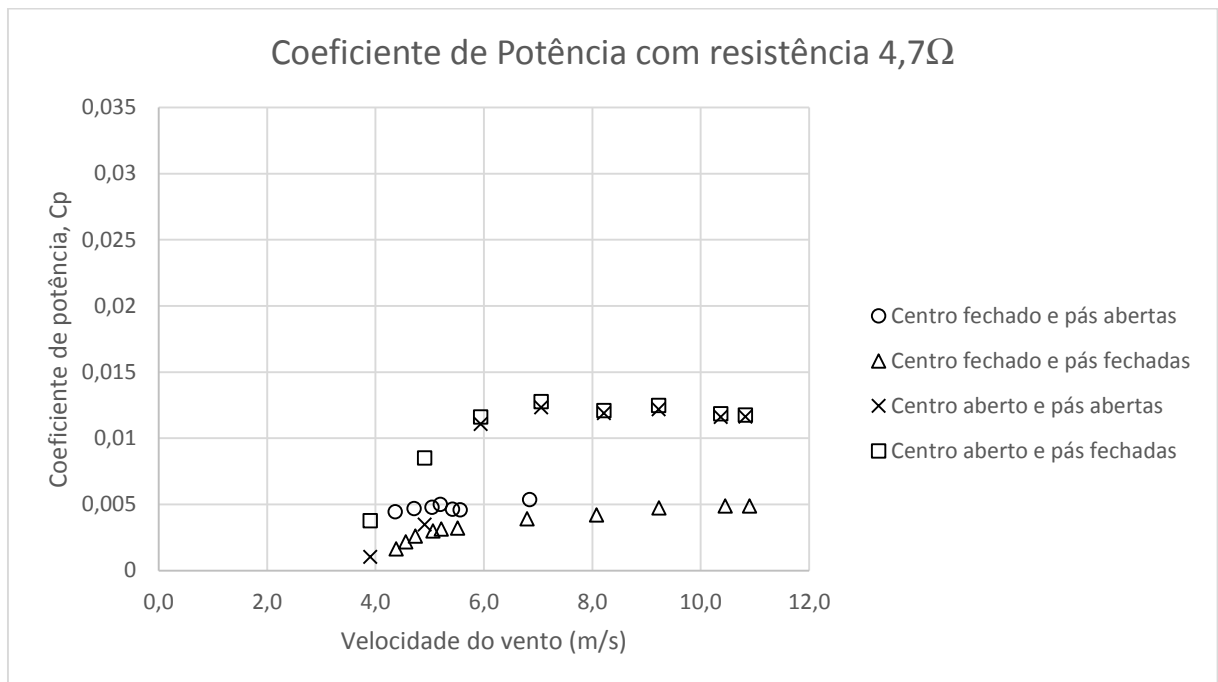


Figura B.3-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $4,7\Omega$

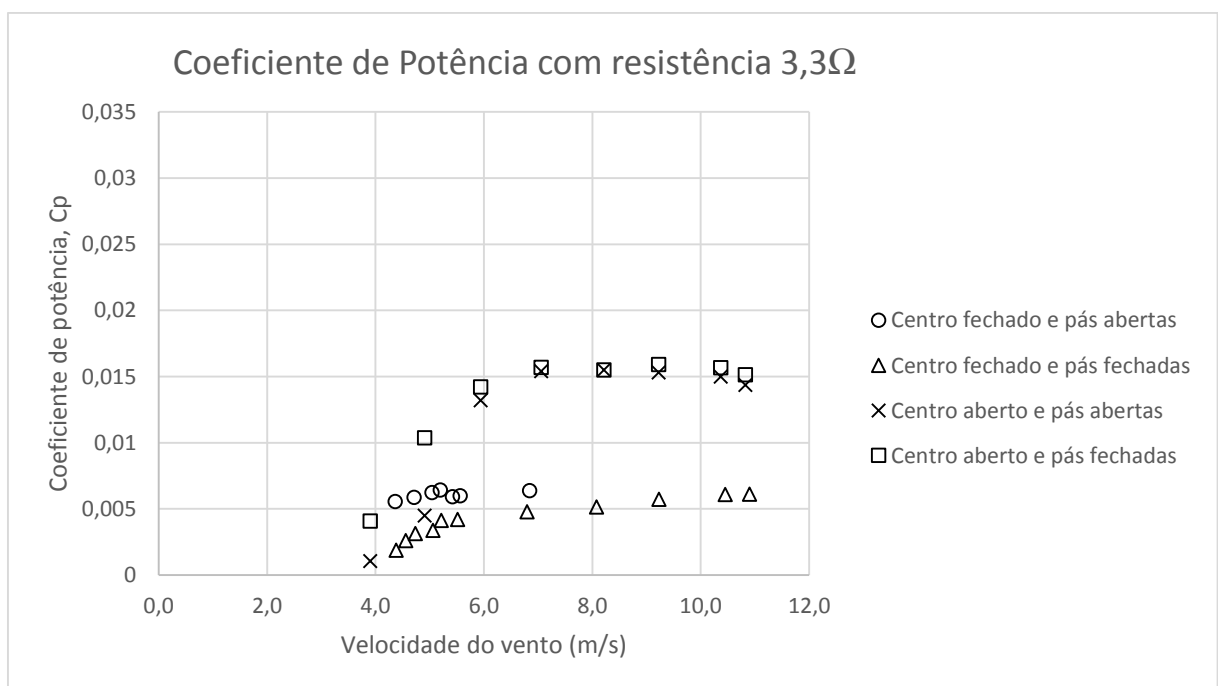


Figura B.4-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $3,3\Omega$

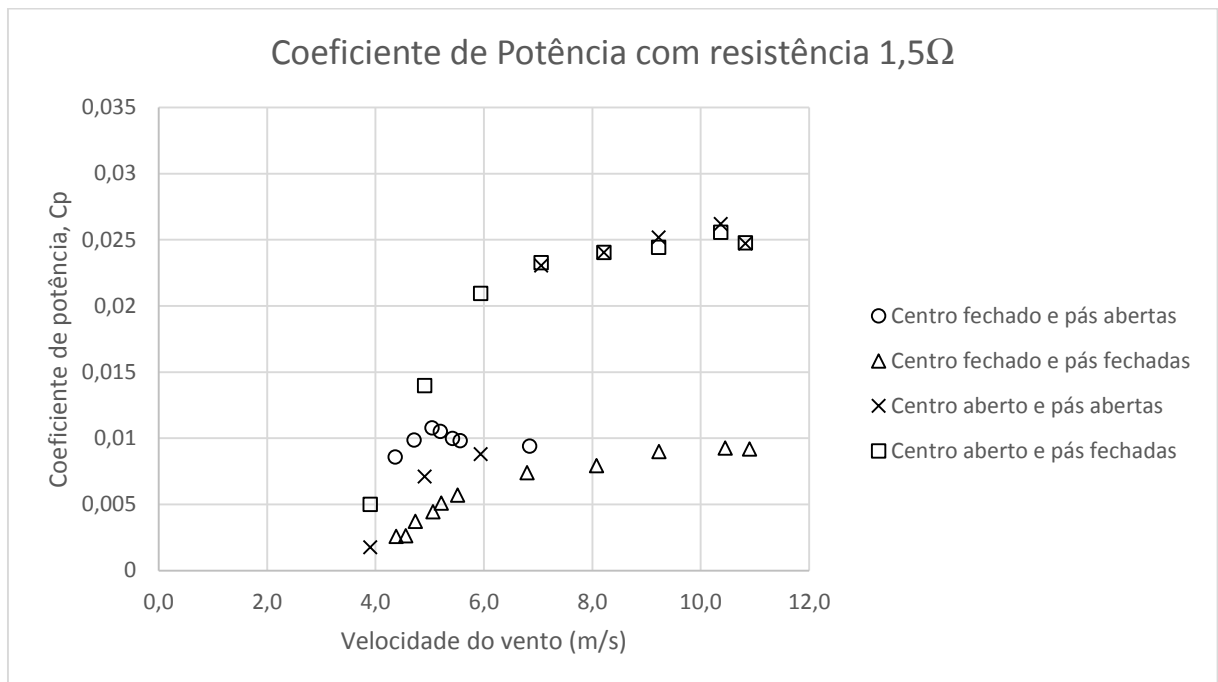


Figura B.5-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $1,5\Omega$

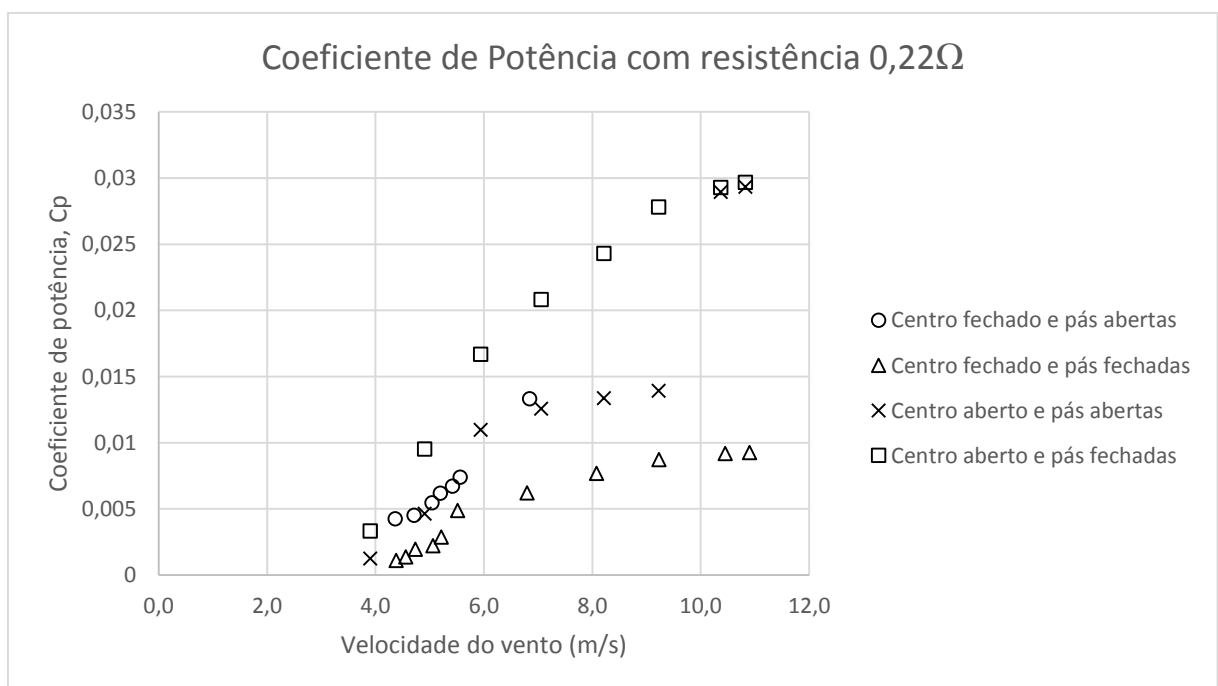


Figura B.6-Coeficiente de potência em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $0,22\Omega$

Anexo C – Gráficos de Coeficiente de Binário

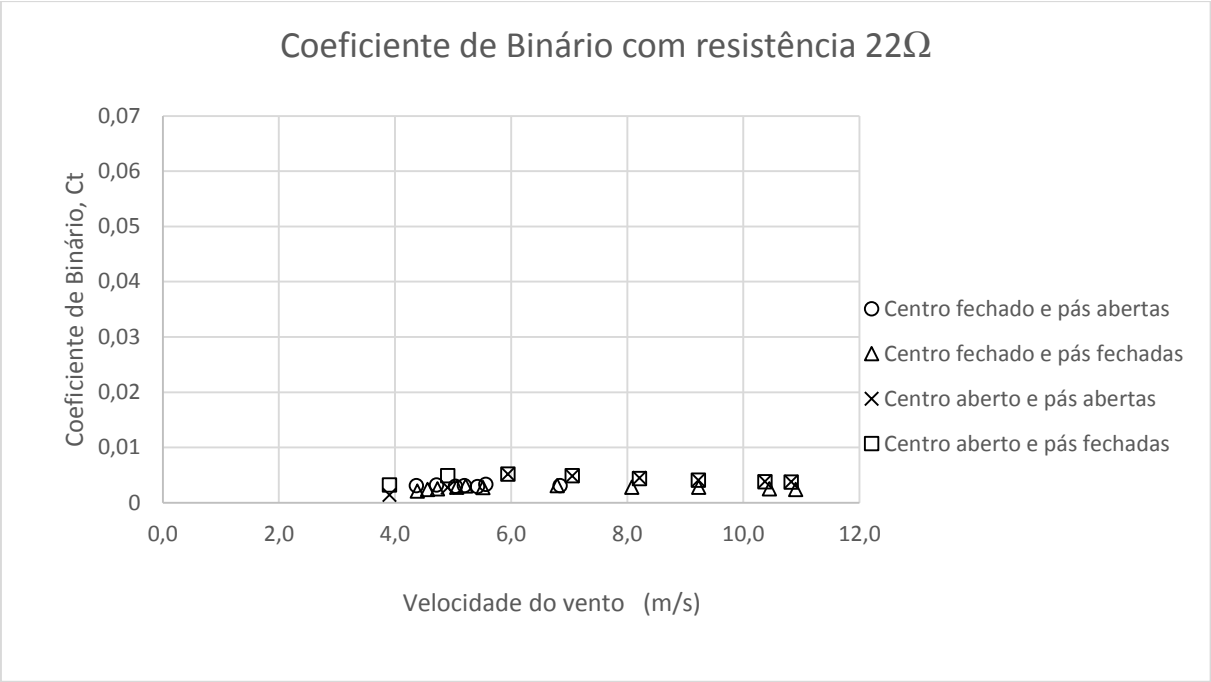


Figura C.1-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de 22Ω

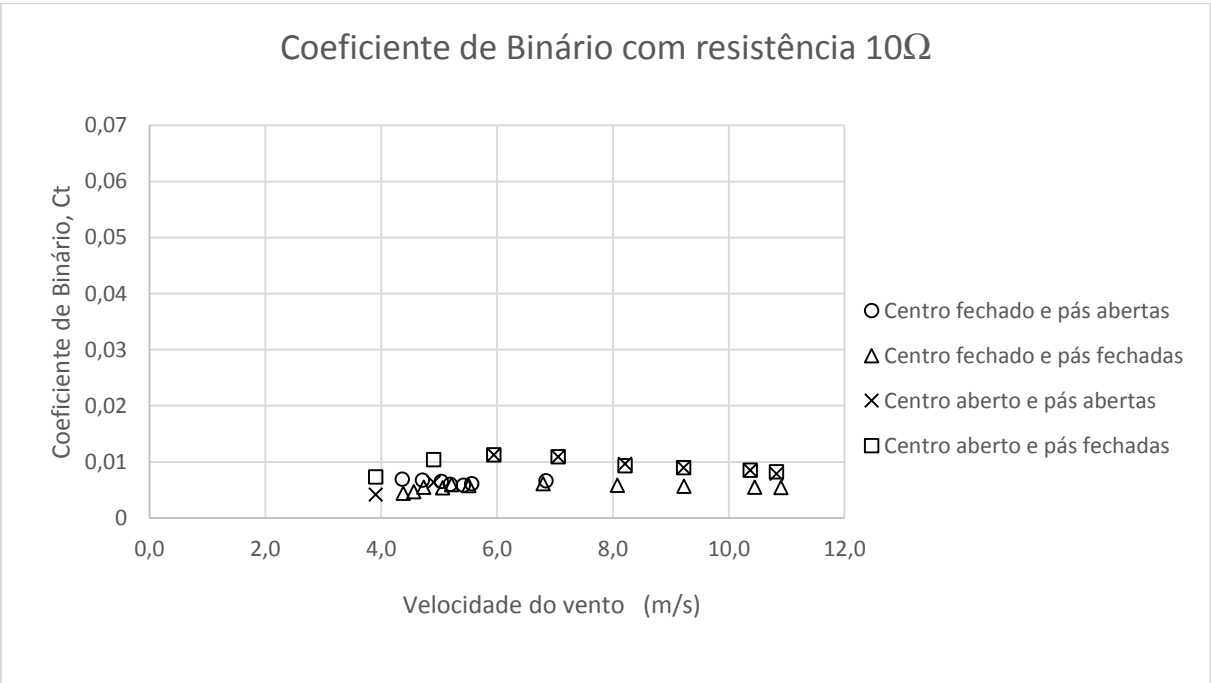


Figura C.2-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de 10Ω



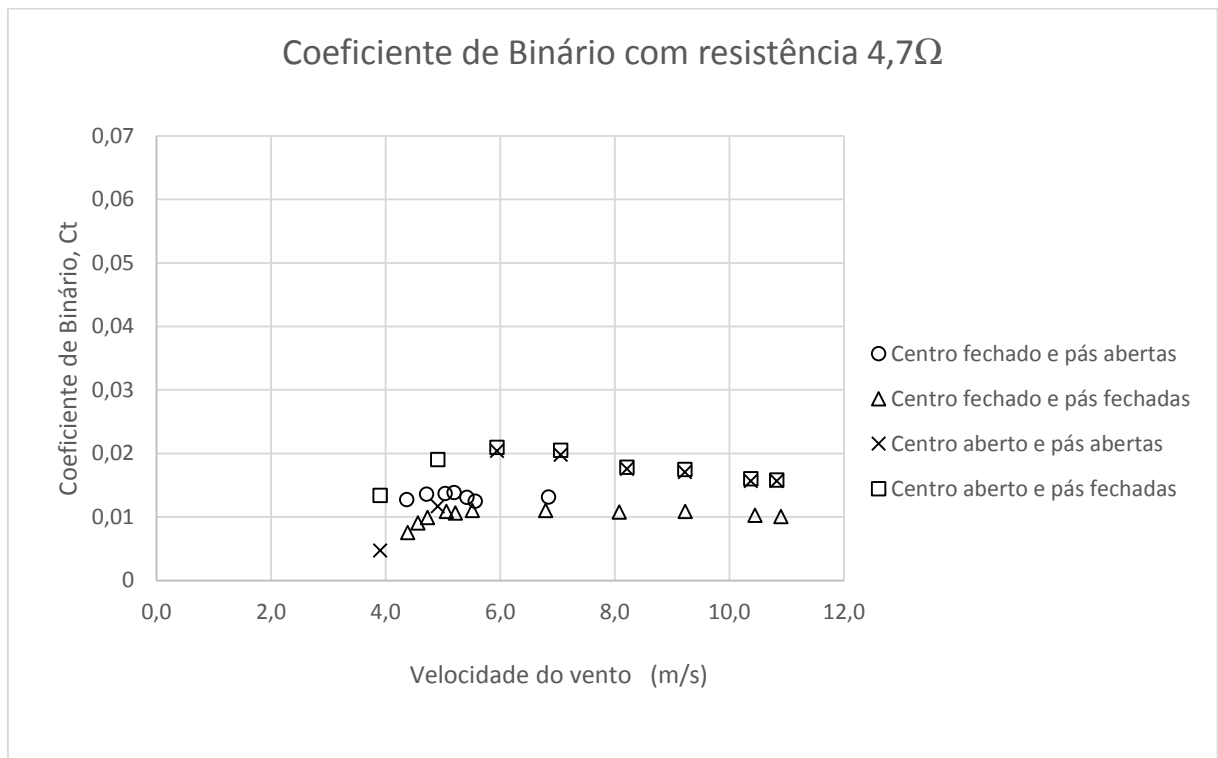


Figura C.3-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $4,7\Omega$

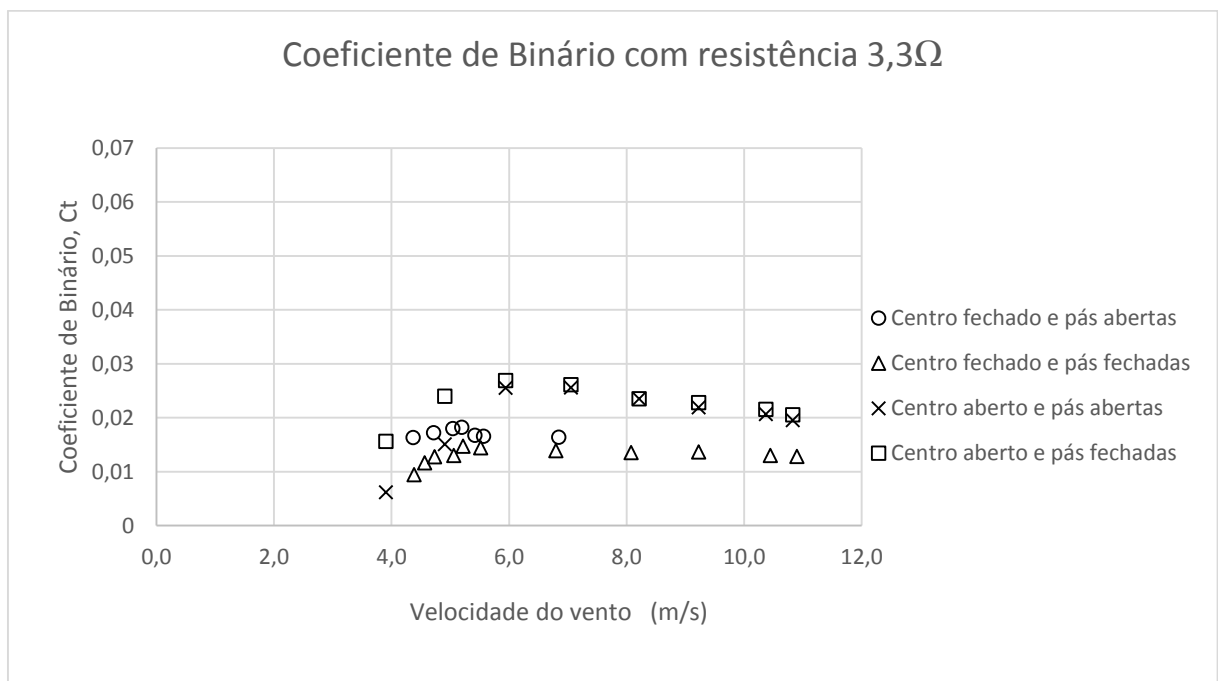


Figura C.4-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $3,3\Omega$

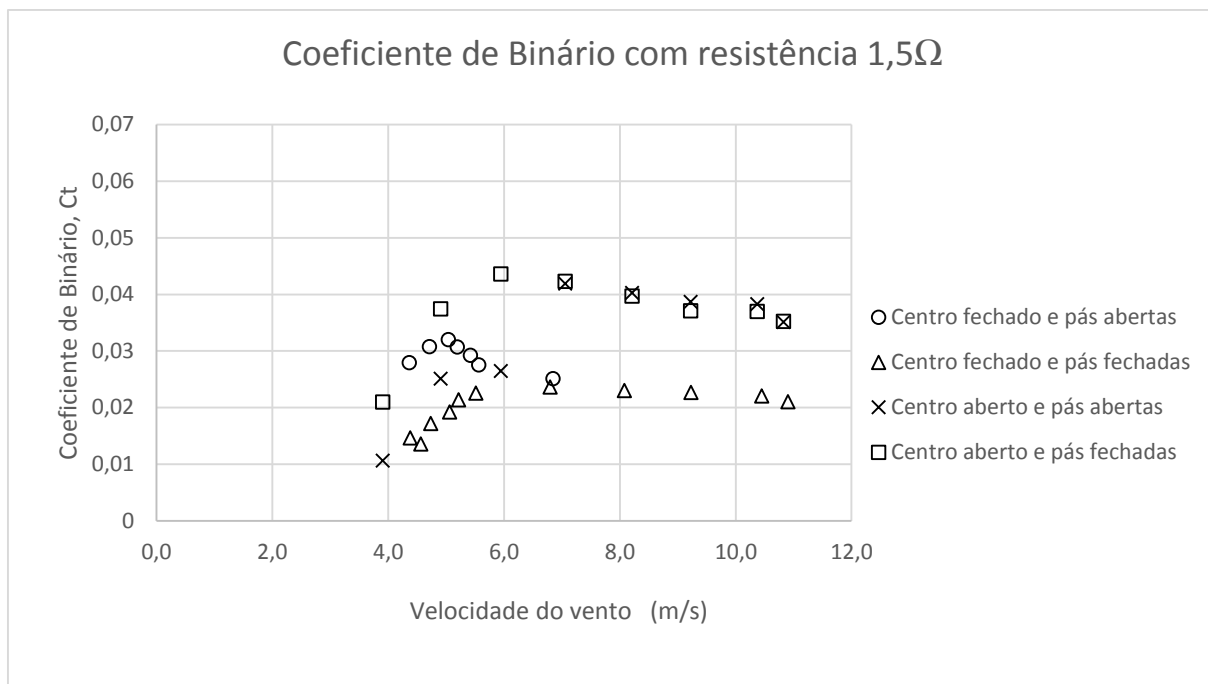


Figura C.5-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $1,5\Omega$

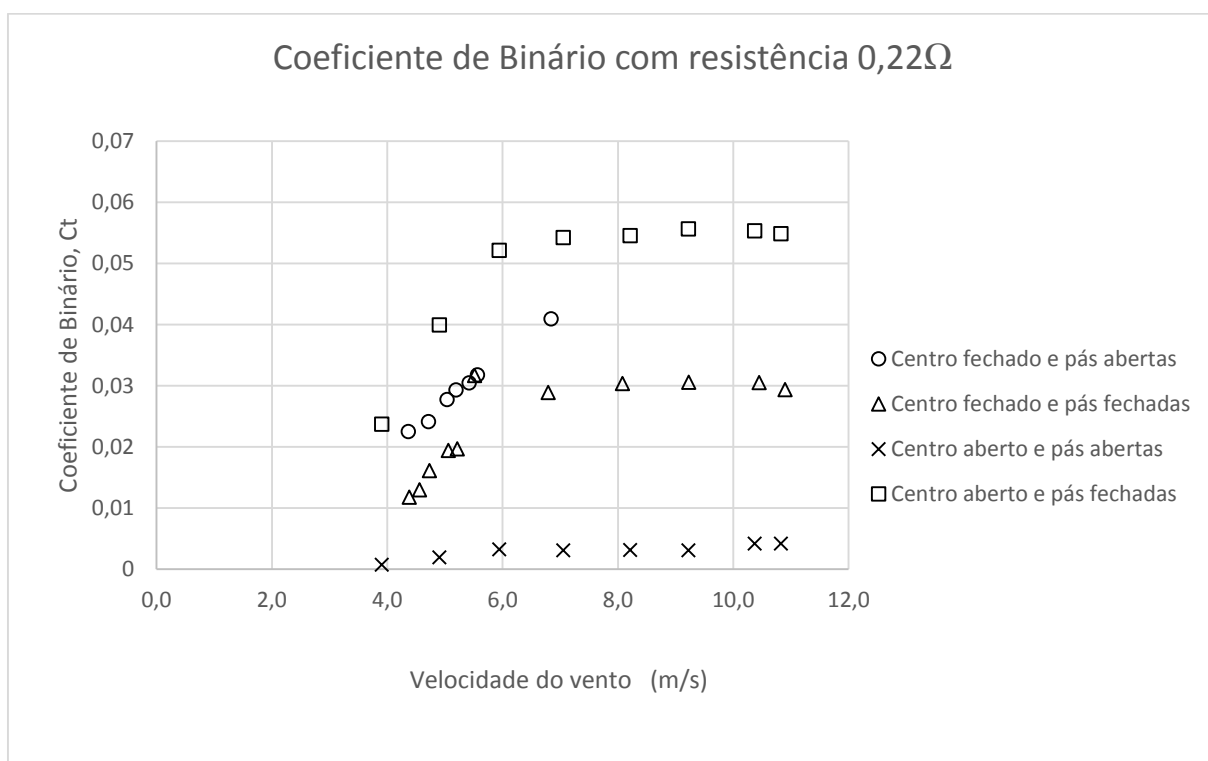


Figura C.6-Coeficiente de binário em diferentes configurações utilizando uma resistência de  $0,22\Omega$

## Anexo D. Determinação da Velocidade de rotação em função da velocidade do vento

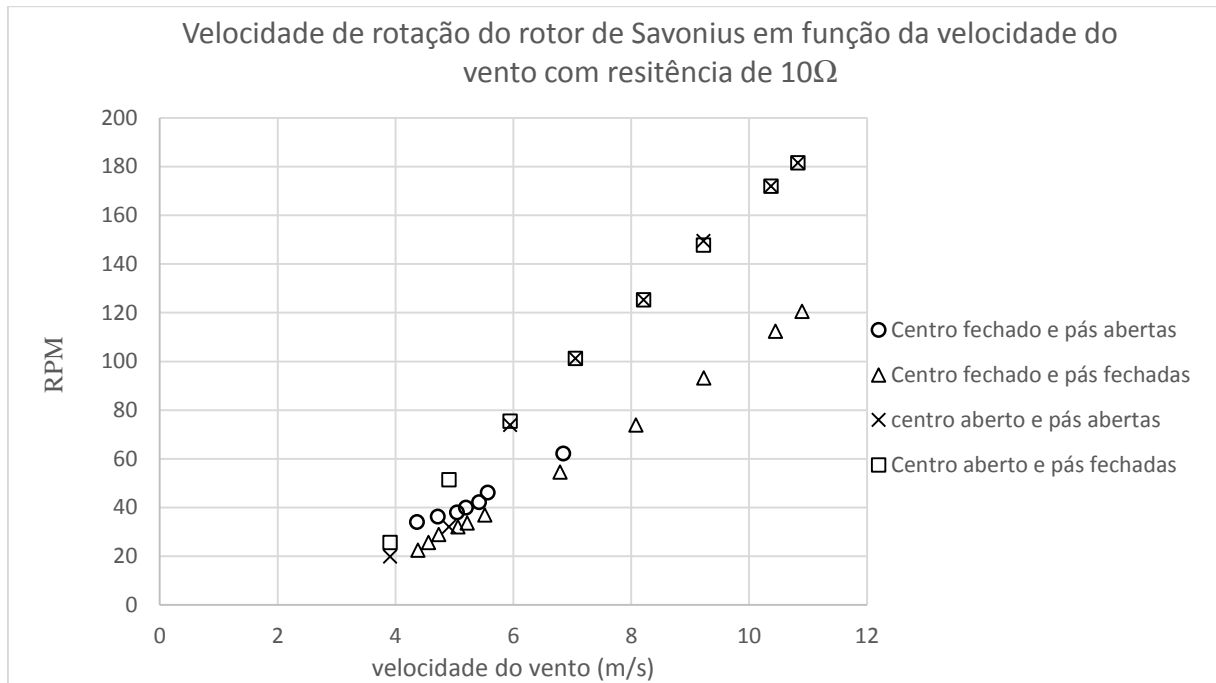


Figura D.1 – Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência  $10\Omega$

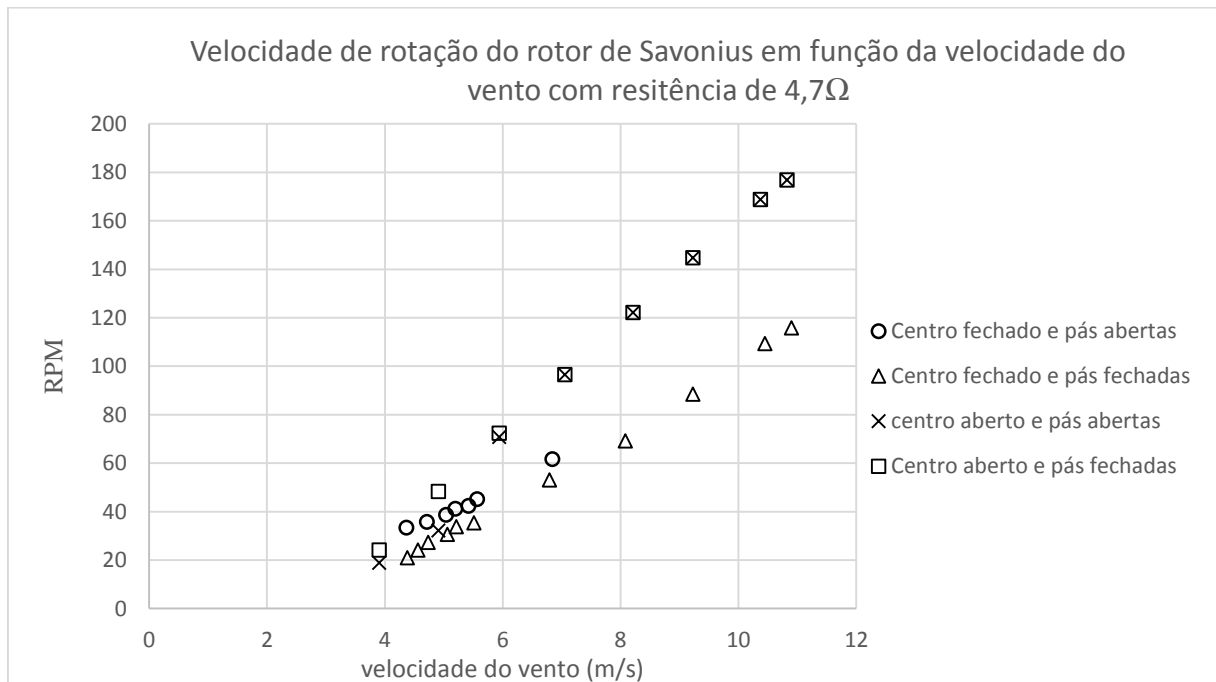


Figura D.2 – Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência  $4.7\Omega$

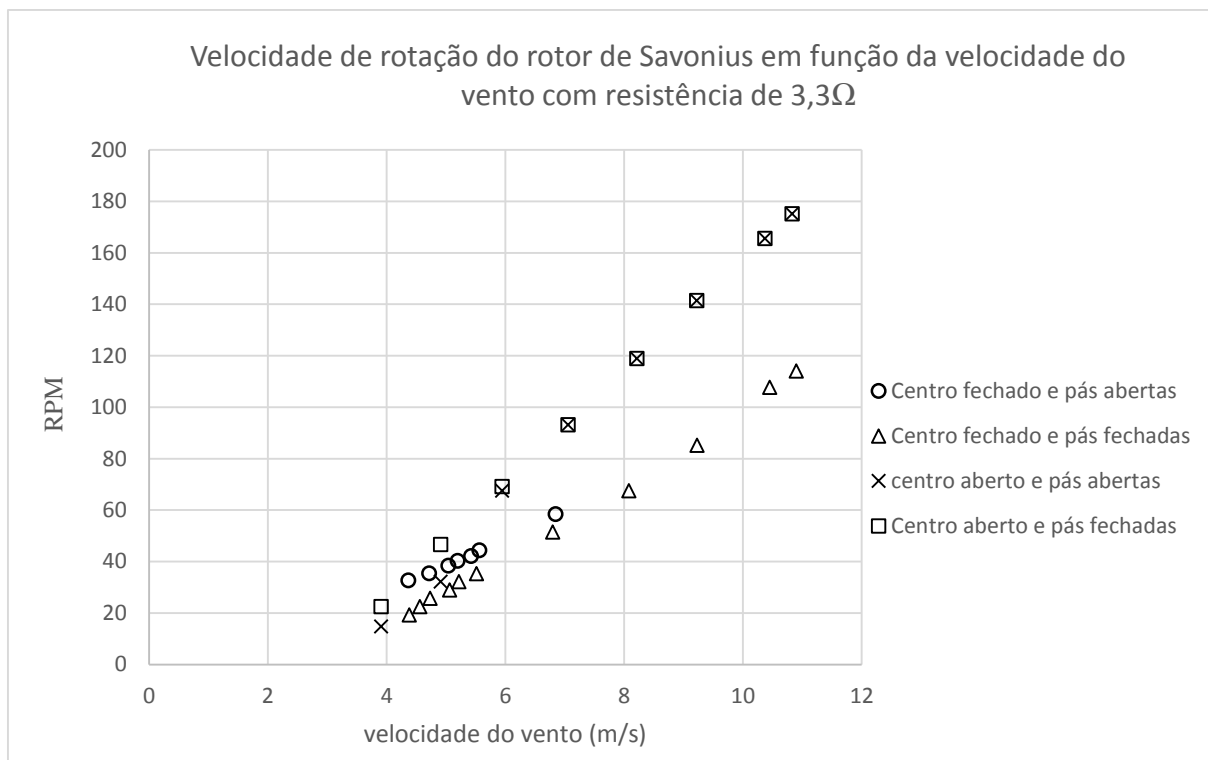


Figura D. 3 – Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência  $3.3 \Omega$

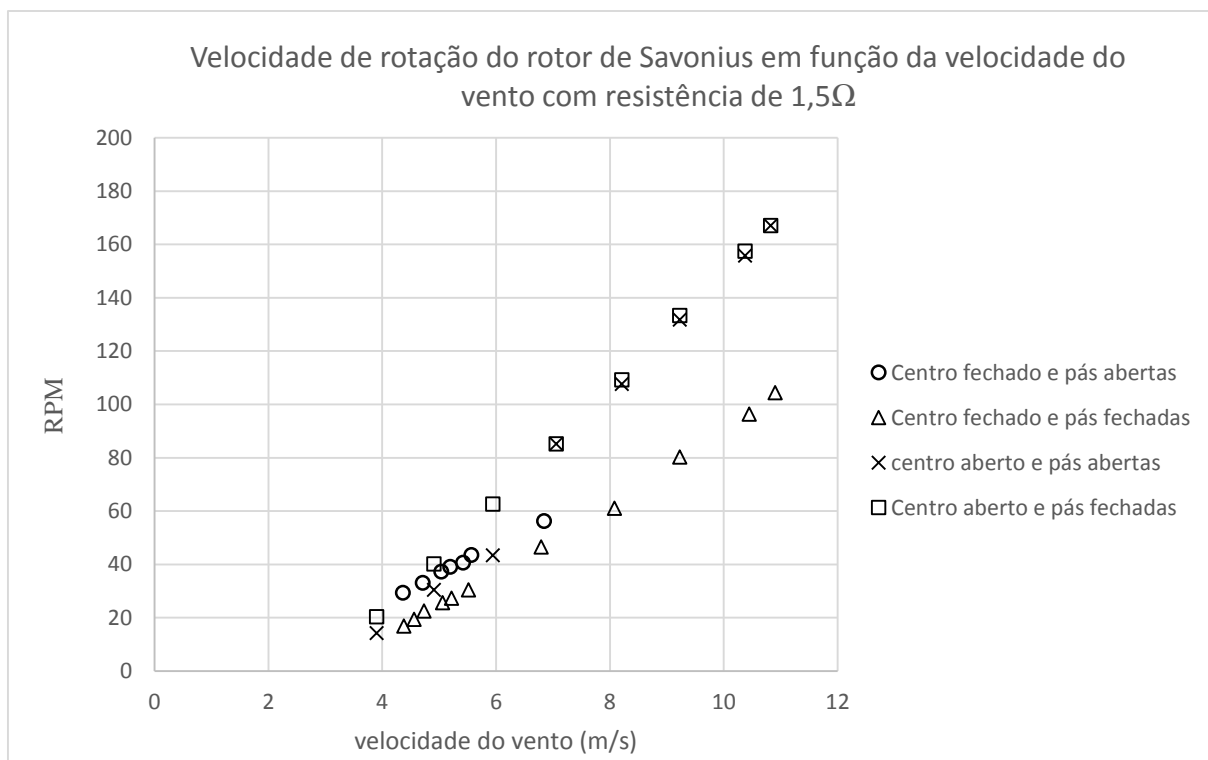


Figura D.4 - Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência  $1.5 \Omega$

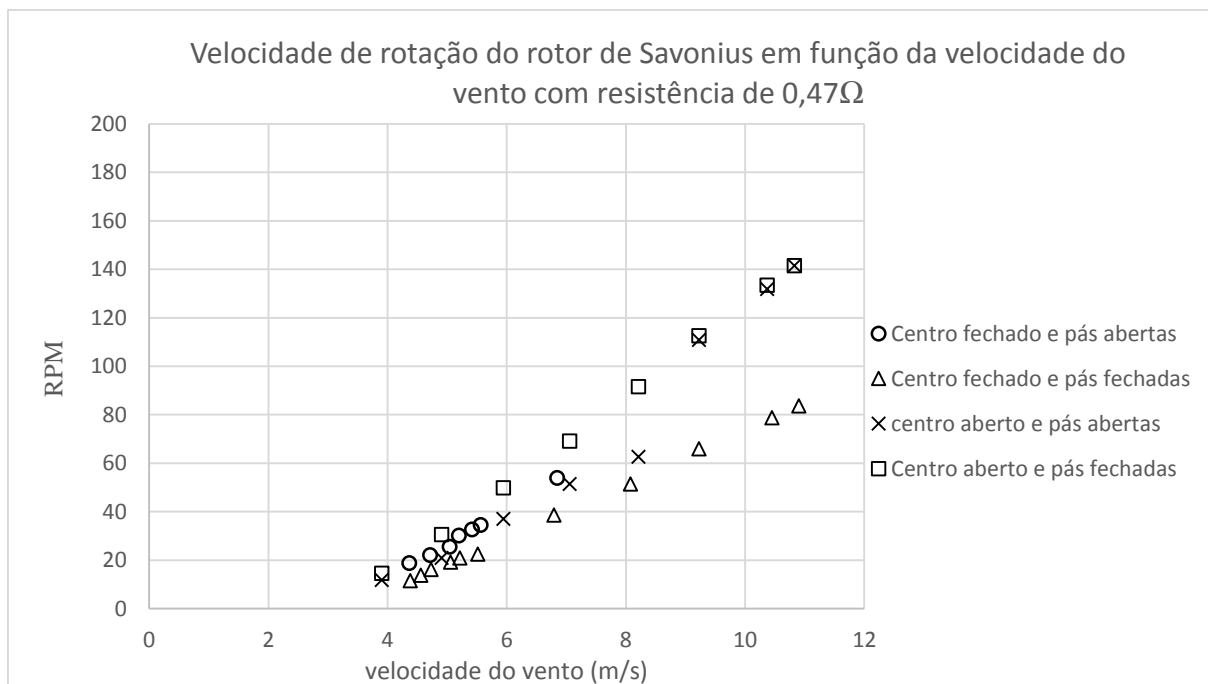


Figura D.5 - Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência  $0,47\Omega$

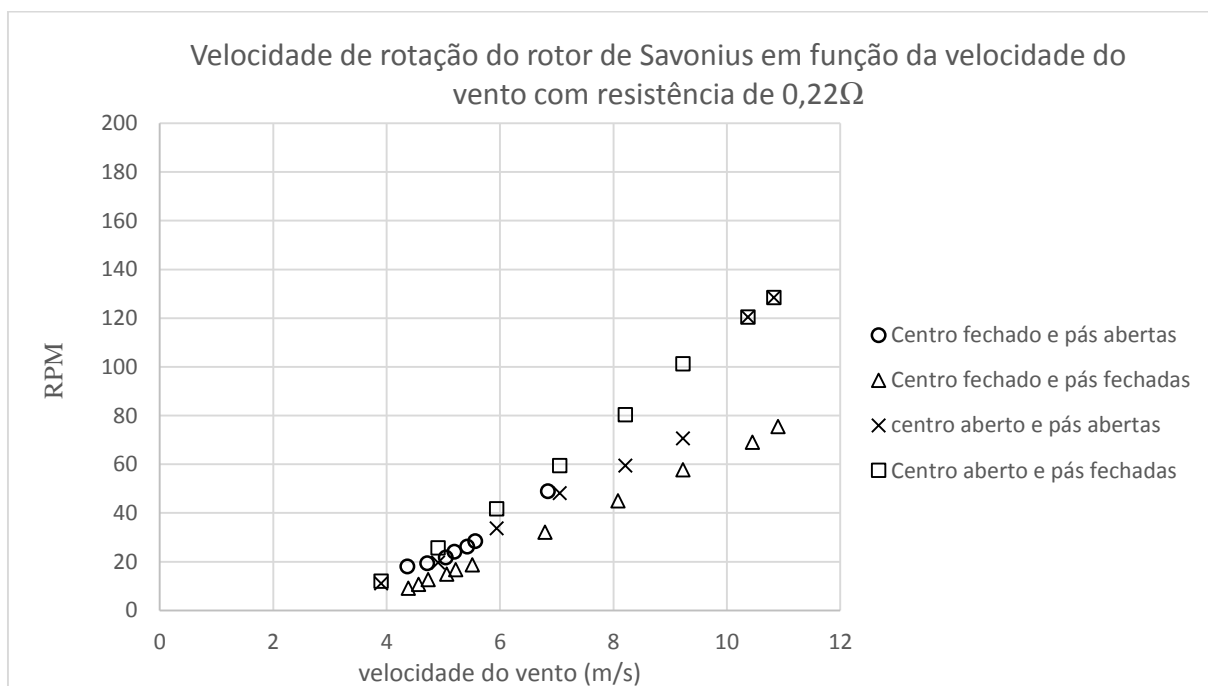


Figura D.6 - Velocidade de rotação do rotor de Savonius com resistência  $0.22\Omega$